

疲労損傷の非破壊計測に関する研究

著者	庄子 哲雄
URL	http://hdl.handle.net/10097/41438

疲労損傷の非破壊計測に関する研究

(研究課題番号 06452143)

平成6年度～平成8年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(2))

研究成果報告書

平成9年4月

研究代表者 庄子哲雄

(東北大学工学部教授)

研究概要

目

次

本研究は疲労破壊防止のための疲労損傷の非破壊計測・評価手法の開発を行ったものである。疲労損傷過程は疲労き裂の発生を境として微視組織への疲労損傷過程とき裂の発生・成長過程に大別できるが、本研究ではその双方について非破壊計測・評価手法を開発・提案した。具体的には、原子炉および化学工業装置に用いられる圧力容器用低合金鋼の低サイクルおよび高サイクル疲労、航空機用オーステナイト系ステンレス鋼のクリープ疲労、Ni基合金の高温低サイクル疲労、焼結鍛造鋼の高サイクル疲労を研究対象とし、疲労損傷の非破壊計測手法として集中誘導型交流電位差法および電気化学的手法等を提案した。	
研究概要	i
研究組織	ii
研究経費	ii
研究発表	iii

低合金鋼の低サイクルおよび高サイクル疲労について集中誘導型交流電位差法による連続モニタリングを実施した結果、き裂初生以前の累積損傷段階では電位差が一旦低下し、き裂の初生・成長に対応して電位差が上昇することが明らかになった。累積損傷段階での電位差の低下は転位構造の変化に伴う透磁率の低下を検出しているものであること、また、その後の電位差の上昇は微視き裂を捉えているものであることが示され、本手法により疲労寿命の全域にわたり疲労損傷を非破壊評価することが明らかになった。焼結鍛造鋼については、交流電位差法と熱弾性効果を利用した応力分布解析により損傷の進展を連続モニタリングできることを明らかにした。Ni基718合金の高温低サイクル疲労に

関係して、化学的エッチング法によるすべり帯の定量化により疲労損傷を定量評価できることが示され、寿命のごく初期から終期までの全域にわたる疲労損傷の非破壊計測・評価に関する研究	1～77
--	------

資料及び参考資料が実現された。

これらの成果により、多様な疲労損傷の非破壊評価手法が可能となった。

東北大学図書



00010138449

附属図書館

本研究は疲労破壊防止のための疲労損傷の非破壊計測・評価手法の開発を行ったものである。疲労損傷過程は疲労き裂の発生を境として微視組織への疲労損傷の累積過程とき裂の発生・成長過程に大別できるが、本研究ではその双方について非破壊計測・評価手法を開発・提案した。具体的には、原子炉および化学工業装置に用いられる压力容器用低合金鋼の低サイクルおよび高サイクル疲労、高温機器用オーステナイト系ステンレス鋼のクリープ疲労、Ni基超合金の高温低サイクル疲労、焼結鍛造鋼の高サイクル疲労を研究対象とし、疲労損傷の新しい非破壊計測手法として集中誘導型交流電位差法および電気化学的手法等を提案した。

低合金鋼の低サイクルおよび高サイクル疲労について集中誘導型交流電位差法による連続モニタリングを実施した結果、き裂初生以前の累積損傷段階では電位差が一旦低下し、き裂の初生・成長に対応して電位差が上昇することが明らかになった。累積損傷段階での電位差の低下は転位構造の変化に伴う透磁率の低下を検出しているものであること、また、その後の電位差の上昇は微視き裂を捉えているものであることが示され、本手法により疲労寿命の全域にわたり疲労損傷を非破壊評価できることが明らかになった。焼結鍛造鋼については、交流電位差法と熱弾性効果を利用した応力分布解析により損傷の進展を連続モニタリングできることを明らかにした。Ni基718合金の高温低サイクル疲労に関しては、化学的エッチング法によるすべり帯の定量化により疲労損傷を定量評価できることが示され、寿命のごく初期から終期までの全域にわたる疲労損傷の非破壊評価手法が実現された。

これらの成果により、多様な疲労損傷についてその非破壊計測・評価手法が可能となった。

要 要 要

研究組織

研究代表者：庄子 哲雄（東北大学工学部教授）

研究分担者：坂 真澄（東北大学工学部教授）

研究分担者：渡辺 豊（東北大学工学部助教授）

研究分担者：中島美樹子（東北大学工学部講師）

研究分担者：玉川 欣治（東北大学工学部助手）

研究協力者：村山 稔（東北大学工学研究科航空宇宙工学専攻）

研究経費

平成6年度 5,500千円

平成7年度 2,000千円

平成8年度 900千円

計 8,400千円

研究発表

(1)学会誌等

T.Shoji,Y.Sato,M.Murayama and Y.Watanabe “Nondestructive Evaluation of Fatigue Processes by ICFPD-Damage Accumulation,Crack Initiation,and Propagation-,Proc.of The First US-Japan Symposium on Advances in NDT, (in press)

村山 稔、庄子 哲雄、渡辺 豊、佐藤 康元、「集中誘導型交流電位差法による疲労損傷の非破壊評価」、日本機械学会誌(A)編（掲載予定）

高橋 和彦、「鉄系焼結鍛造材の疲労特性に及ぼす表面欠陥の影響」、日本金属学会誌 第60巻9号、1996年、816-825 ページ

(2)口頭発表

村山 稔、「集中誘導型交流電位差法による低サイクル疲労損傷の計測」、日本機械学会平成7年度材料力学部門講演会、平成7年8月

村山 稔、「集中誘導型交流電位差法による疲労損傷の計測」、日本非破壊検査協会平成8年度春季大会、平成8年3月

村山 稔、「集中誘導型交流電位差法による疲労損傷の計測」、日本機械学会東北支部代32期総会・講演会、平成9年3月

駒崎 慎一、「エッチング法による INCO718 の高温疲労損傷評価」、日本機械学会平成7年度材料力学部門講演会、平成7年8月

第1章 序 論

目 次

第1章 序 論	1
第2章 供試材および実験方法	6
2-1 供試材および疲労試験	6
2-1-1 供試材	6
2-1-2 疲労試験	6
2-2 集中誘導型交流電位差法による計測	11
2-2-1 集中誘導型交流電位差法の原理と特色	11
2-2-2 自動計測システム	11
2-3 表面微小き裂の計測方法	12
2-4 疲労損傷材の透磁率計測	12
第3章 集中誘導型交流電位差法による疲労損傷計測可能性の検討	19
3-1 はじめに	19
3-2 試験片、探触子および計測方法	19
3-2-1 試験片および疲労損傷付与試験条件	19
3-2-2 測定探触子	20
3-2-3 計測方法	20
3-3 計測結果および考察	25
3-3-1 電位差分布と疲労繰返し数	25
3-3-2 電位差分布と微視損傷	26
3-4 まとめ	27
第4章 集中誘導型交流電位差法による疲労損傷の連続計測・評価	42
4-1 はじめに	42
4-2 試験片、探触子および計測方法	42
4-2-1 試験片および疲労損傷付与試験条件	42
4-2-2 測定探触子	43
4-2-3 計測方法	43

4-3	計測結果および考察	49
4-3-1	電位差分布と疲労繰返し数	49
4-3-2	中断材計測結果との比較	50
4-3-3	き裂分布と規格化電位差	51
4-3-4	集中誘導型交流電位差法による疲労損傷の評価	52
4-4	まとめ	54
第5章	結 論	76
第1章	緒 言	1
第2章	試験装置と試験方法	11
第3章	試験結果と考察	21
第4章	結 論	54
第5章	結 論	76
第6章	結 論	76
第7章	結 論	76
第8章	結 論	76
第9章	結 論	76
第10章	結 論	76
第11章	結 論	76
第12章	結 論	76
第13章	結 論	76
第14章	結 論	76
第15章	結 論	76
第16章	結 論	76
第17章	結 論	76
第18章	結 論	76
第19章	結 論	76
第20章	結 論	76
第21章	結 論	76
第22章	結 論	76
第23章	結 論	76
第24章	結 論	76
第25章	結 論	76
第26章	結 論	76
第27章	結 論	76
第28章	結 論	76
第29章	結 論	76
第30章	結 論	76
第31章	結 論	76
第32章	結 論	76
第33章	結 論	76
第34章	結 論	76
第35章	結 論	76
第36章	結 論	76
第37章	結 論	76
第38章	結 論	76
第39章	結 論	76
第40章	結 論	76
第41章	結 論	76
第42章	結 論	76
第43章	結 論	76
第44章	結 論	76
第45章	結 論	76
第46章	結 論	76
第47章	結 論	76
第48章	結 論	76
第49章	結 論	76
第50章	結 論	76
第51章	結 論	76
第52章	結 論	76
第53章	結 論	76
第54章	結 論	76
第55章	結 論	76
第56章	結 論	76
第57章	結 論	76
第58章	結 論	76
第59章	結 論	76
第60章	結 論	76
第61章	結 論	76
第62章	結 論	76
第63章	結 論	76
第64章	結 論	76
第65章	結 論	76
第66章	結 論	76
第67章	結 論	76
第68章	結 論	76
第69章	結 論	76
第70章	結 論	76
第71章	結 論	76
第72章	結 論	76
第73章	結 論	76
第74章	結 論	76
第75章	結 論	76
第76章	結 論	76
第77章	結 論	76
第78章	結 論	76
第79章	結 論	76
第80章	結 論	76
第81章	結 論	76
第82章	結 論	76
第83章	結 論	76
第84章	結 論	76
第85章	結 論	76
第86章	結 論	76
第87章	結 論	76
第88章	結 論	76
第89章	結 論	76
第90章	結 論	76
第91章	結 論	76
第92章	結 論	76
第93章	結 論	76
第94章	結 論	76
第95章	結 論	76
第96章	結 論	76
第97章	結 論	76
第98章	結 論	76
第99章	結 論	76
第100章	結 論	76

第1章 序 論

過酷な使用条件下で優れた性能を発揮する産業プラントや機器に破壊・破損事故が生じた場合、これによって生じる社会的・経済的な影響は極めて大きいものとなる。このため、経年使用に対する構造物の余寿命評価に関する技術の確立が、安全性の確保と信頼性の向上を図るという立場から社会的に強く望まれている¹⁾。このようなことから、構造物に対する設計技術と保守検査の重要性が認識されるようになってきた。

構造物の破壊・破損には疲労が関与していることが多い^{2),3)}。ことにプラントの高経年化が進む中で、疲労破壊は予兆なしに事故に至り大きな人的あるいは経済的損失につながる可能性がある。そのため、疲労破壊の防止は構造物の健全性評価あるいは余寿命評価を行う上で、緊急かつ最重要なものとして取り組むべき課題の一つとされる。

材料が疲労に至る過程は明らかに複雑なものであるが、疲労の進行に伴う単純化した過程として次のような連続した3段階に分類できる⁴⁾。

(1) 疲労損傷の累積

(2) 微小疲労き裂の発生と成長

(3) 巨視き裂の成長

これらについては、これまで多くの研究が行われ様々な現象が明らかにされてきている⁵⁾。まず(1)の段階においては、常温で特に低応力振幅の場合は結晶粒内の特定の領域に転位組織と関連したすべりの集中が生じ、いわゆる固執すべり帯となる⁶⁾。一方、高応力振幅のもとでは結晶粒内のすべりは比較的均一になるが、粒界近傍では相隣り合う結晶間の方位の違いに基づくひずみの不適合のために局所的なひずみの集中が生じる^{7)~9)}。続く(2)の段階では、低応力振幅の場合固執すべり帯の表面凹凸のうち入り込み部を起点としき裂の発生が起こる¹⁰⁾。高応力振幅の場合は局所的なひずみ集中箇所にき裂の発生が起こる⁷⁾

~⁹⁾。これらのき裂がある程度の密度に達すると、(3)段階の巨視き裂が発生し、ついには破壊を引き起こす。

疲労破壊の防止については一部のプラントでは、設計段階において疲労損傷の評価手法は確立されている。これは材料の設計疲労線図（負荷応力振幅と許容繰返し数の関係を示す線図で、通常、疲労試験データの平均 S-N 曲線に適当な安全係数や平均応力効果等を見込んで設定される）を基にするもので、想定される応力振幅での許容繰返し数に対する想定される繰返し数の比を線形加算（マイナー則¹¹⁾）し、この合計が1を越えないように設計を行っている。しかしながら、このような手法をすべての部位に適用するのは実際的でないこと、また想定外事象によって負荷応力が予測値を超えることはよくあることから、この手法ですべての対策とはならない。実際のプラントでは負荷応力履歴が必ずしも明確でなく、損傷程度が把握されないまま、疲労によって破損するケースが多い。そこで、工学的な余寿命評価の手段として実機に累積されている疲労損傷を非破壊的検出法により直接測定する方法を確立し、従来法の欠点を補うことができれば、余寿命評価に大きく役立つものと考えられる。

この非破壊的な疲労損傷検出法については、すでに30年以上前に基礎研究が行われている¹²⁾。これまでに報告されている研究例は多岐にわたるが、例えば疲労に伴う材料内部の微視的構造変化を測定対象とした X 線応力測定法の適用が行われているが、(1)計測装置が複雑かつ大がかりであるために現場向きではない、(2)材料内部の応力状態の変化を検出するためには破壊法でなければならない、といった問題を抱えている¹³⁾。この他にも超音波法¹⁴⁾、磁気ひずみ法¹⁵⁾、BHN 法¹⁶⁾など様々な方法が検討されてきた。しかし、これらはいずれも一長一短で、実用化されるまでには至っていないようである。

欠陥の非破壊計測・評価法の一つとして、電位差法がある。電位差法は、何らかの方法で測定物に電流を流し、それによって生ずる電位分布を計測するものである。電位差法は疲労き裂の検出及びその深さ測定を目的とした探傷装置の開発などが手がけられている¹⁷⁾が、累積損傷を含めた疲労損傷評価への適用例はあまり報告されていない。

交流電位差法の一つとして、電磁誘導現象を利用して測定物に交流電流を流

す新しい電位差法である集中誘導型交流電位差法 (Induced Current Focusing Potential Drop; ICFPD)が開発された^{18),19),20)}。この手法の研究はこれまで欠陥探傷に限られており、疲労損傷の計測に適用された例はない。しかしながら、電位分布に加えて透磁率など材料の電磁氣的物性値に関する情報も利用可能であり、電流が表面近傍だけに流れる表皮効果の活用も加えて疲労過程で生じる微小な表面き裂や疲労過程での材料の電磁氣的性質の変化をも計測できる可能性を有している。

本研究は、原子力圧力容器に通常用いられる、圧力容器用鋼の疲労損傷計測に集中誘導型交流電位差法を適用し、その疲労損傷の非破壊評価手法としての可能性を検討したものである。

本論文は、全5章からなる。第2章では集中誘導型交流電位差法の原理について概説するとともに、本論文で行った実験方法について述べる。第3章では、疲労試験中断材について計測・評価を行い、本手法の疲労損傷に対する非破壊的な計測の可能性を検証する。第4章では、現位置計測のための装置を用いて単一の試験片に与えた疲労損傷をその段階毎に計測し、新しい疲労損傷の非破壊評価法を提案する。第5章は結論である。

参考文献

- 1) 例えば、吉井徳治, 勝又健一, 野間口道義, 榊 昌英, 島田道男, 滝沢千嘉子
構造用鋼の疲労損傷の非破壊評価技術、船舶技術研究報告 24-1 (1987)
pp. 21-41
- 2) 真壁朝敏：非破壊的手法による疲労損傷の検出技術について、日本機
械学会誌 95-888 (1987) p.1022
- 3) 真壁・西田・兼城・玉城：機械学会論文集 58-551, A (1992) p.1191
- 4) 横堀武夫：機械学会誌 58-10 (1955) p.712
- 5) E.Orowan : Reports on Progress in Physics, 12 (1949) p.185
- 6) A.T.Winter: A Model for the Fatigue of Copper at Low Plastic Strain
Amplitudes, Phil.Mag., 31 (1975) p.339
- 7) R.C.Boettner, C.Laird and A.J.McEvily, Jr. : Crack Nucleation and Growth
in High Strain-Low Cycle Fatigue, Trans.Met.Soc.AIME, 233 (1965) p.379
- 8) C.Laird and C.E.Feltner: The Coffin-Manson Law in Relation to Slip
Character, Trans.Met.Soc.AIME, 239 (1967) p.1074
- 9) W.H.Kim and C.Laird: Crack Nucleation and Stage I Propagation in High
Strain Fatigue- I . Microscopic and Interferometric Observations, - II .
Mechanism, Acta Met., 26 (1978) pp.777-789
- 10) K.Katagiri, A.Omura, K.Koyanagi, J.Awatani, T.Shiraishi and H.Kaneshiro:
Early Stage Crack Tip Dislocation Morphology in Fatigued Copper,
Met.Trans., 8A (1977) p.1769
- 11) Miner, M.A., Trans. Am.Soc.Mech.Engng, J.appl.Mech., 67, A-159(1945)
- 12) 干潟：金属の塑性変形と超音波減衰の関係について、機械研究所報告
39 (1980)
- 13) 岩柳順二, 安福精一：磁気的方法による残留応力の測定、応用物理 47-2
(1978) pp.161-166
- 14) 尾野英夫, 仁瓶寛太, 吉田 昌, 堀川 武：疲労損傷の非破壊的検出と残
存寿命予測法、溶接学会誌 56-7 (1987) pp.35-39
- 15) 遠藤和芳, 吉永昭男, 中野政身, 岡崎洋二：磁気的方法による鋼材の曲げ

第2章 供試材および実験方法

2-1 供試材および疲労試験

2-1-1 供試材

供試材は原子炉圧力容器に通常用いられる圧力容器用調質型（焼入れ、焼もどし）マンガンモリブデンニッケル鋼鋼板 SA 533 B - 1 である。供試材の化学組成を表 2-1 に、機械的性質を表 2-2 にそれぞれ示す。試験片はすべて試験片軸を圧延方向と一致させて採取してある。疲労寿命試験を実施するために用意した試験片は図 2-1 に示されるような平行部の径 10mm の平滑丸棒疲労試験片である。計測に供した試験片の形状については各章において詳しく説明する。

2-1-2 疲労試験

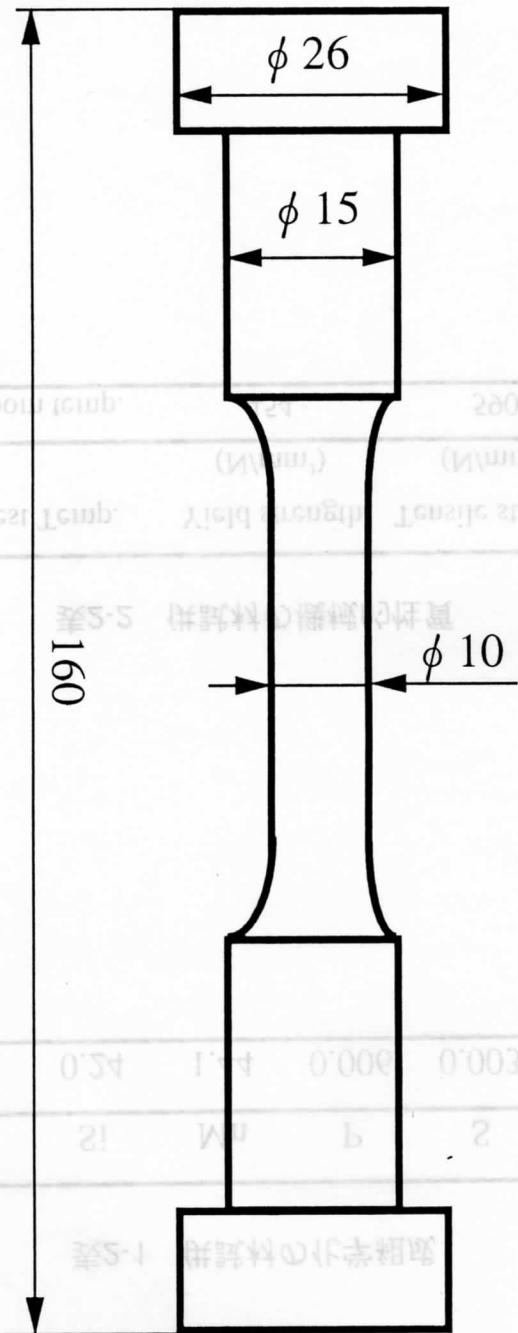
本研究では、疲労試験はすべて電気油圧サーボ型疲労試験機を用い、引張圧縮完全両振の疲労試験を実施した。試験は試験片ゲージ部に取り付けられた伸び計を用いてひずみ制御により行われた。伸び計はその先端がゲージ部に一定圧で接触しており、ゲージ部長さの変動を制御できるものである。すべての試験はひずみ速度 0.4%/sec で実施された。試験温度は室温とし、試験雰囲気は大気とした。まず疲労寿命試験を実施した。負荷ひずみ範囲は、全ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_t$ が 0.35% ~ 2.0% の間の 10 条件であり、試験結果を表 2-3 にまとめて示す。ここで疲労寿命 N_{25} は引張側の最高荷重が寿命の約半分での値から 25% 低下した繰返し数と定義した。試験結果を $\Delta \epsilon_t$ - N_{25} 線図として表示したものが図 2-2 である。同図には、 $\Delta \epsilon_p$ - N_{25} 線図もあわせて示した。この図をもとに第 3 章で行う試験条件を 2 種決定した。

表2-1 供試材の化学組成

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo
RT	0.18	0.24	1.44	0.006	0.003	0.65	0.54

表2-2 供試材の機械的性質

Material	Test Temp.	Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)
RT	Room temp.	454	590	27.5



(単位：mm)

図2-1 平滑丸棒疲労試験片の形状

表2-3 疲労寿命試験結果

試験片番号	ひずみ範囲	N _f /2におけるひずみ範囲および応力値					繰返し数
	$\Delta \varepsilon_t$ (%)	$\Delta \varepsilon_p$ (%)	$\Delta \varepsilon_e$ (%)	$\Delta \sigma$ (Mpa)	σ_{\max} (Mpa)	σ_{\min} (Mpa)	N ₂₅ (cycles)
1	0.35	0.033	0.317	607	301	-306	328,460
2	0.38	0.035	0.345	659	321	-338	113,200
3	0.4	0.055	0.345	661	328	-333	96,280
4	0.5	0.147	0.353	675	335	-340	37,240
5	0.6	0.229	0.371	710	353	-357	14,780
6	0.7	0.237	0.363	693	343	-350	13,200
7	0.8	0.408	0.391	748	372	-376	7,945
8	1.2	0.776	0.423	809	401	-408	2,528
9	1.6	1.154	0.446	854	421	-433	1,372
10	2.0	1.530	0.470	898	442	-456	815

注) $\Delta \varepsilon_e = \Delta \sigma / E$ Eは告示の公称値(191,100MPa)を用いた。

$\Delta \varepsilon_p = \varepsilon_t - \varepsilon_e$

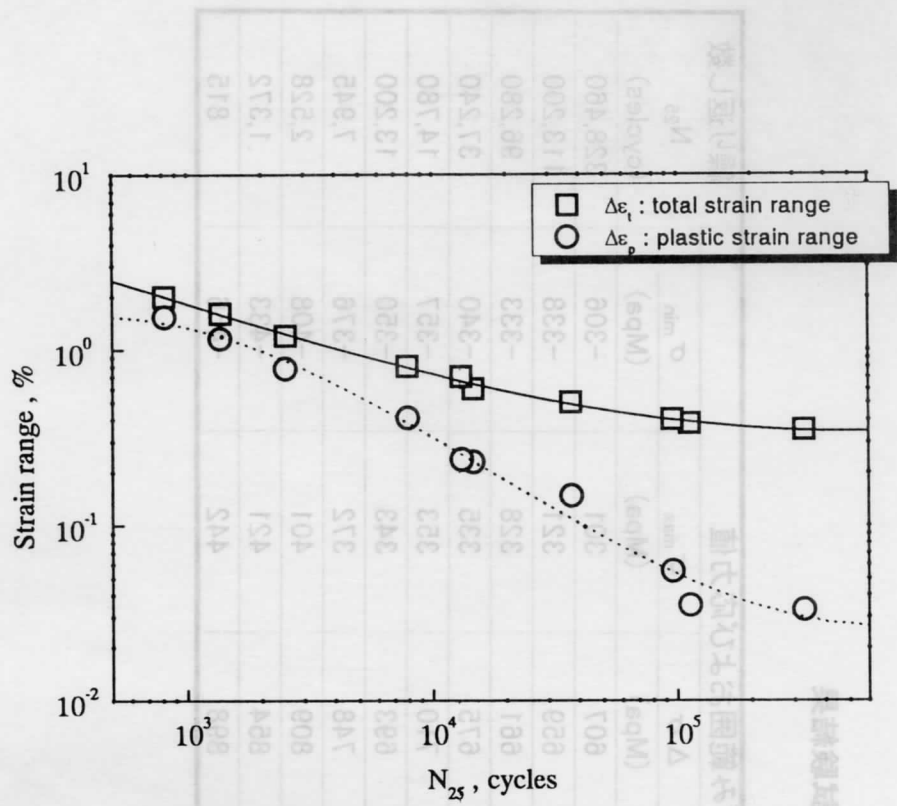


図2-2 疲労寿命試験の試験結果

2-2 集中誘導型交流電位差法による計測

2-2-1 集中誘導型交流電位差法の原理と特色

図2-3に本方法の原理を示す。ICFPDは電磁誘導の原理を利用した新しい交流電位差法である。被測物である金属の表面に誘導線を置き、これに交流電流を流すことで誘導線の周りに変動磁場を発生させ、誘導電流により生ずる電位差を計測するものである。誘導電流は一般の交流電流と同じ性質を有するので、表皮効果により試験片の表面領域を流れやすい。交流磁場は誘導線に近づく程大きくなるため、誘導電流の電流密度は誘導線近傍で急激に高くなる。このことは有限要素法を用いた解析によっても明らかにされており、その様子は図2-3の中に模式的に表現されている。一定の間隔を有する電位差計測端子を用いて表面の電位差を計測すると、欠陥部における電流経路は欠陥のない部分における電流経路よりも長くなり、欠陥を跨ぐ位置で測定される電位差は大きくなる。また、図中に合わせて示した式が示すように、計測される電位差は電気伝導度(σ)および透磁率(μ)など材料の電磁氣的物性値の変化を反映する。以上のことから、疲労過程で生じる微小き裂あるいは物性値変化を感度良く計測できると期待される。

ここで従来の交流電位差法と比較したICFPDの特色を列記する。

- (1)探傷領域に集中して大きな電流を誘導することができ、測定対象物にかかわらず大型電源を必要としない。
- (2)試験片に電流入出力端子を接続する必要がないため、コンパクトなセンサーを用いて移動測定が可能である。
- (3)熟練度が不要である。

ICFPDは以上の特色を持つことから計測の自動化が可能となる。

2-2-2 自動計測システム (図2-4)

計測は、自動計測システムを使用することで自動的に走査・計測を行うことが可能である。自動計測システムの概略図を図2-5に示す。計測システムは大きく5つの機器に分けられる。すなわち、探触子移動装置、ドライバーボックス、制御用パーソナルコンピュータ、測定器、探触子である。このうち、本研

究で使用した測定機器は英国の Matelect 社の汎用交流電位差測定装置である CGM5 である。測定電位差はコンピュータに自動的に取り込まれる。探触子については、使用した探触子の設計が実験毎に異なるため、その都度詳しく説明する。

2-3 表面微小き裂の計測方法

試験片表面上の電位差計測地点におけるき裂の存在およびその表面長さ計測を目的とし、試験片の表面観察をレプリカ法により行った。レプリカ法はき裂など試験片表面の形状をフィルム上に写し取ることができ、そのフィルムを顕微鏡などにより直接観察することで試験片表面上のき裂の位置および表面長さ計測が可能となる。フィルムはアセチルセルロースフィルムを用い、溶剤には酢酸メチルを使用した。レプリカの採取は疲労試験を施した後計測を行う前に行った。ゲージ部内に設定した計測面全面にわたって採取し、電位差の計測地点と試験片表面の位置関係が確認できるよう注意して採取した。保存しておいたレプリカフィルムの観察は光学顕微鏡により行い、写真上で拡大しき裂の位置及び表面長さを計測した。

2-4 疲労損傷材の透磁率計測

疲労損傷を受けた材料について、その透磁率計測を行った。新材と計測終了後の疲労試験中断材について、そのゲージ部より図 2-6 に示す薄板形状の試験片を作製した。試験片の作製は、材料に疲労以外の塑性ひずみを極力与えぬようワイヤーカットにより行った。また、切り出した試験片にき裂が含まれないようにするため、疲労損傷材の中心部から切り出し、作製した試験片にき裂の存在がないことは実体顕微鏡を用いた観察により確認した。図 2-7 に計測システムの概略図を示す。計測システムは、大きく分けてコイル、センサー、測定器、コンピュータの 4 つからなる。測定器としては、(株)理研電子の B-H Loop Tracer を用いた。計測はまず、コイルに周波数 0.5Hz の交流電流を流すことで試験片に磁場を与え、試験片中を通過する磁束密度をセンサーを通して測定器

により求め、材料の磁化曲線を明らかにする。材料の透磁率は、求められた磁化曲線から算出する。材料に与える磁場の方向は、集中誘導型交流電位差法による計測の際、試験片中を流れる誘導電流と同方向になるようにした。

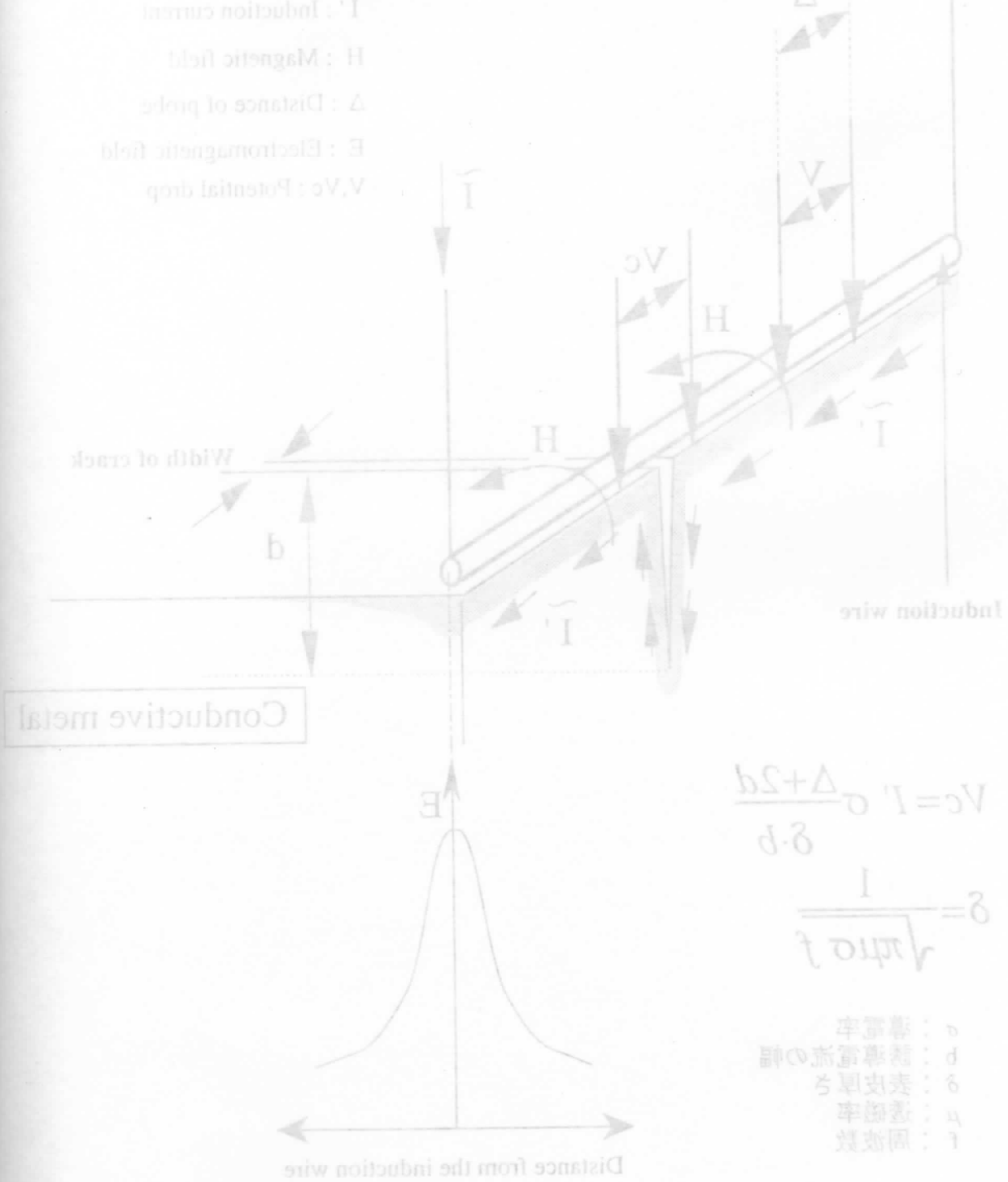


図2-3 集中誘導型交流電位差法の原理

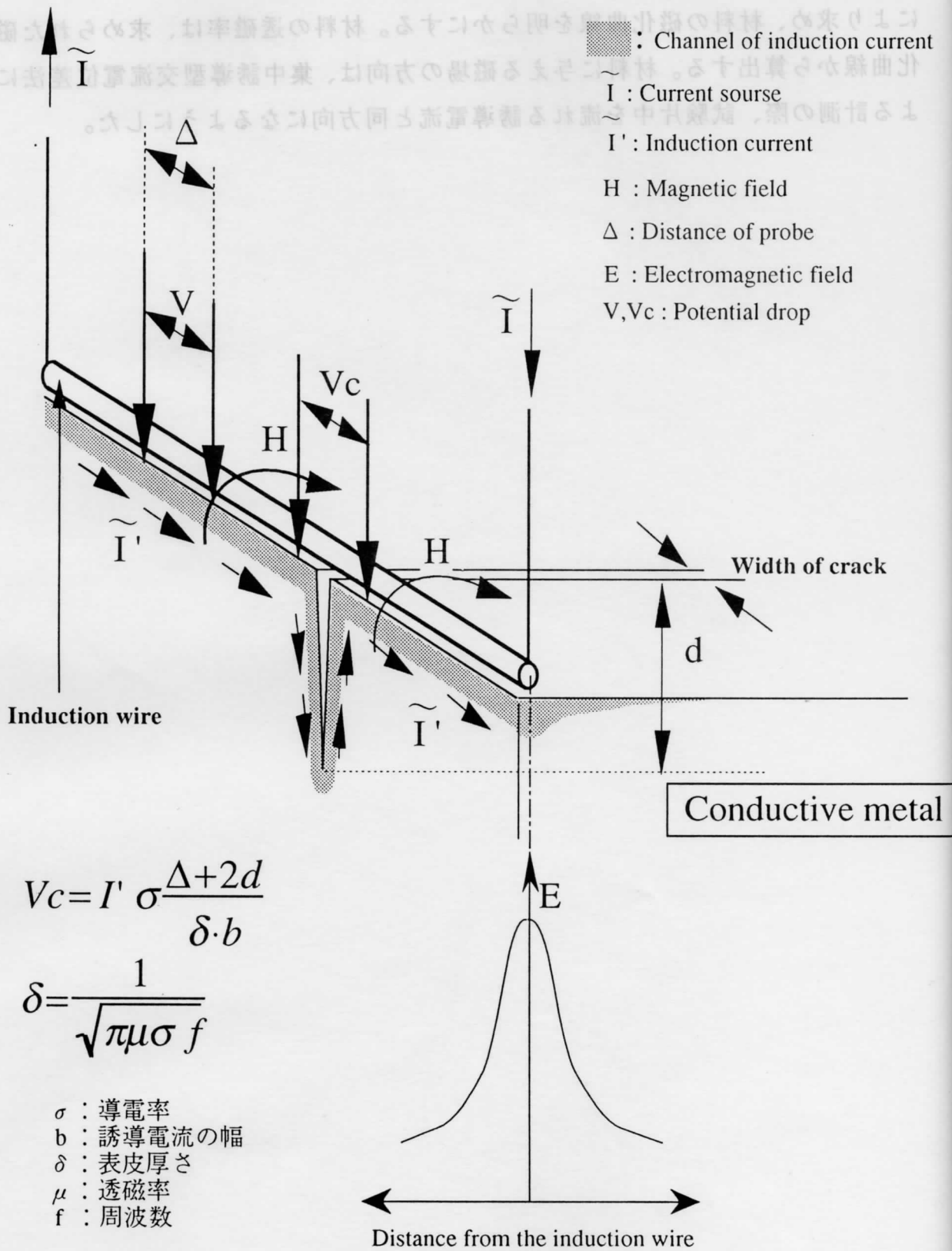


図2-3 集中誘導型交流電位差法の原理

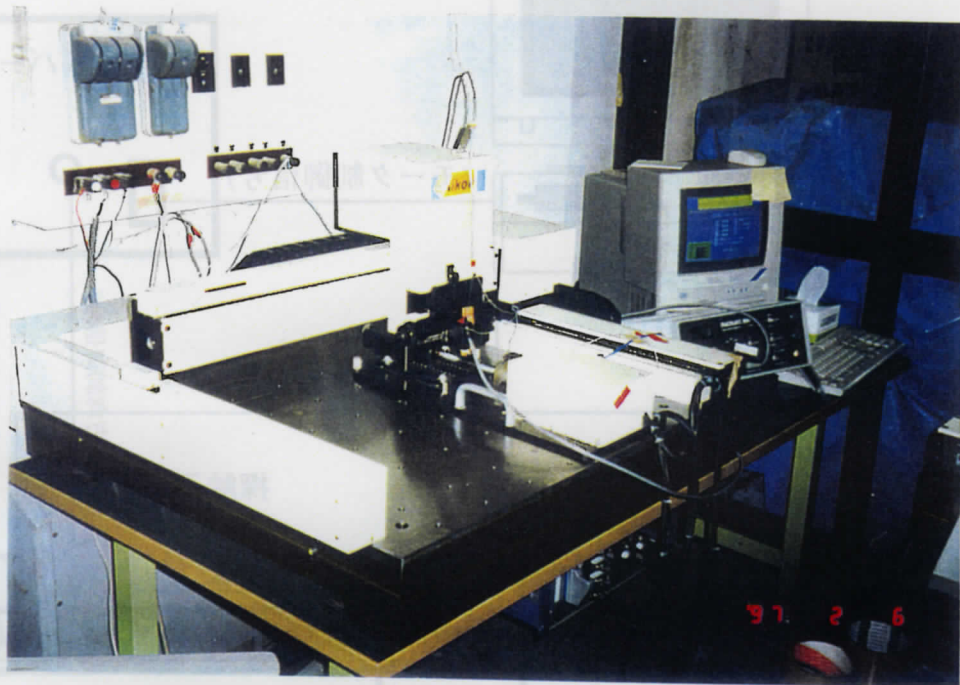


図 2-4 計測システム

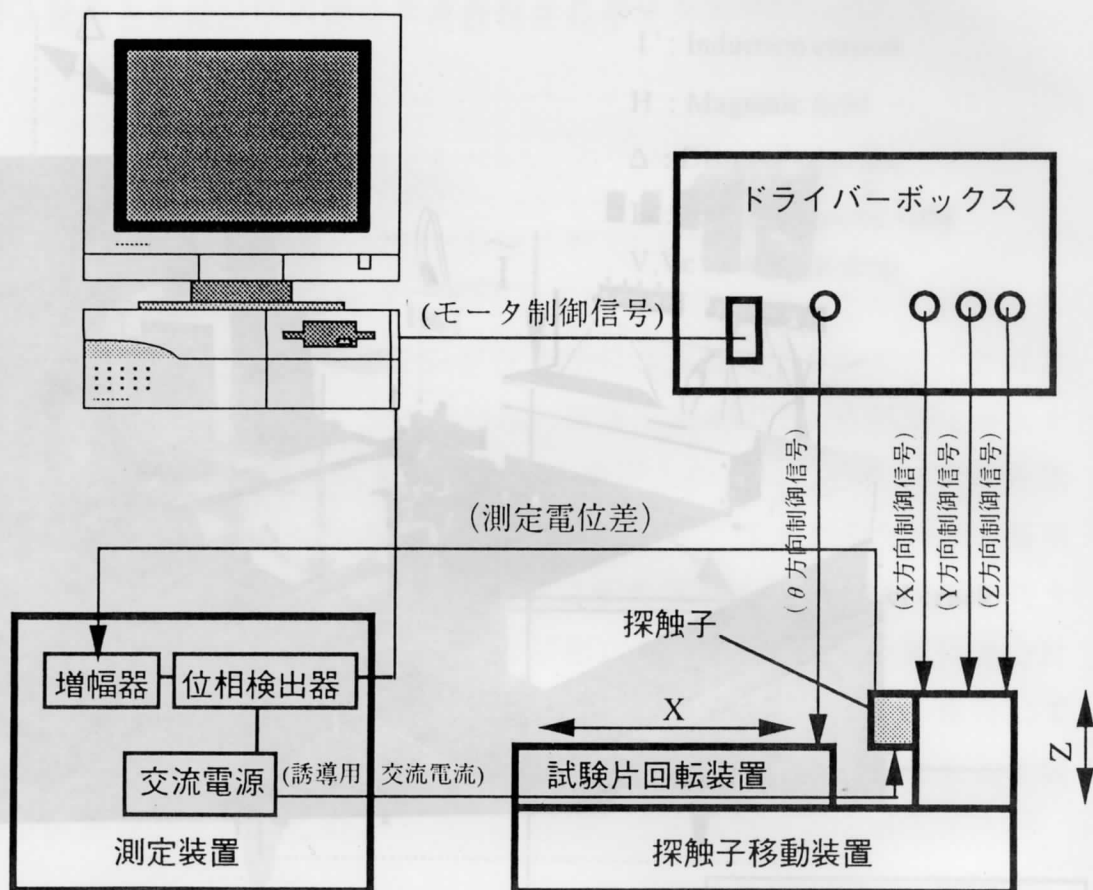


図2-5 計測システムの概略図

図2-6 透磁率計測用試験片の模式図

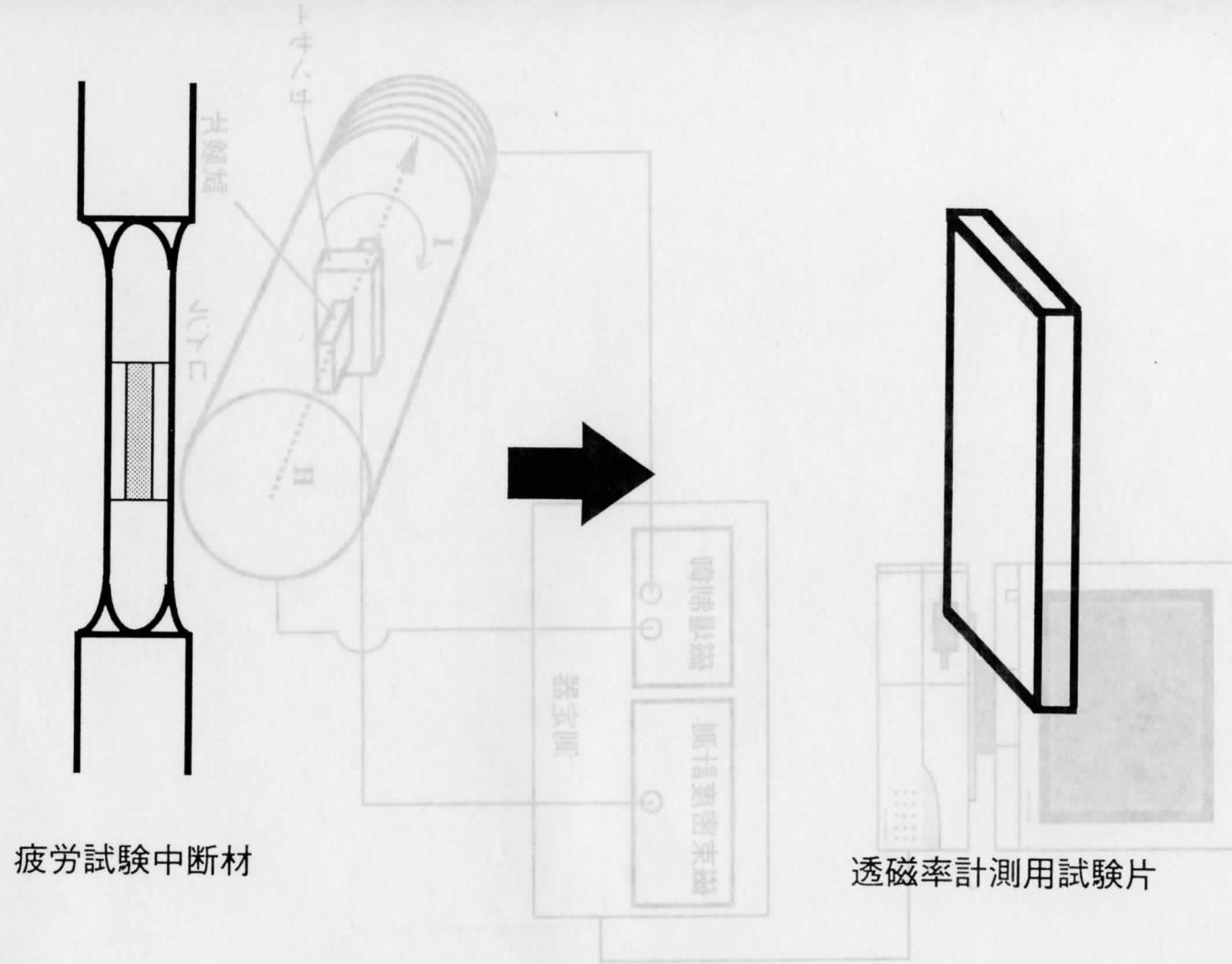


図2-6 透磁率計測用試験片の模式図

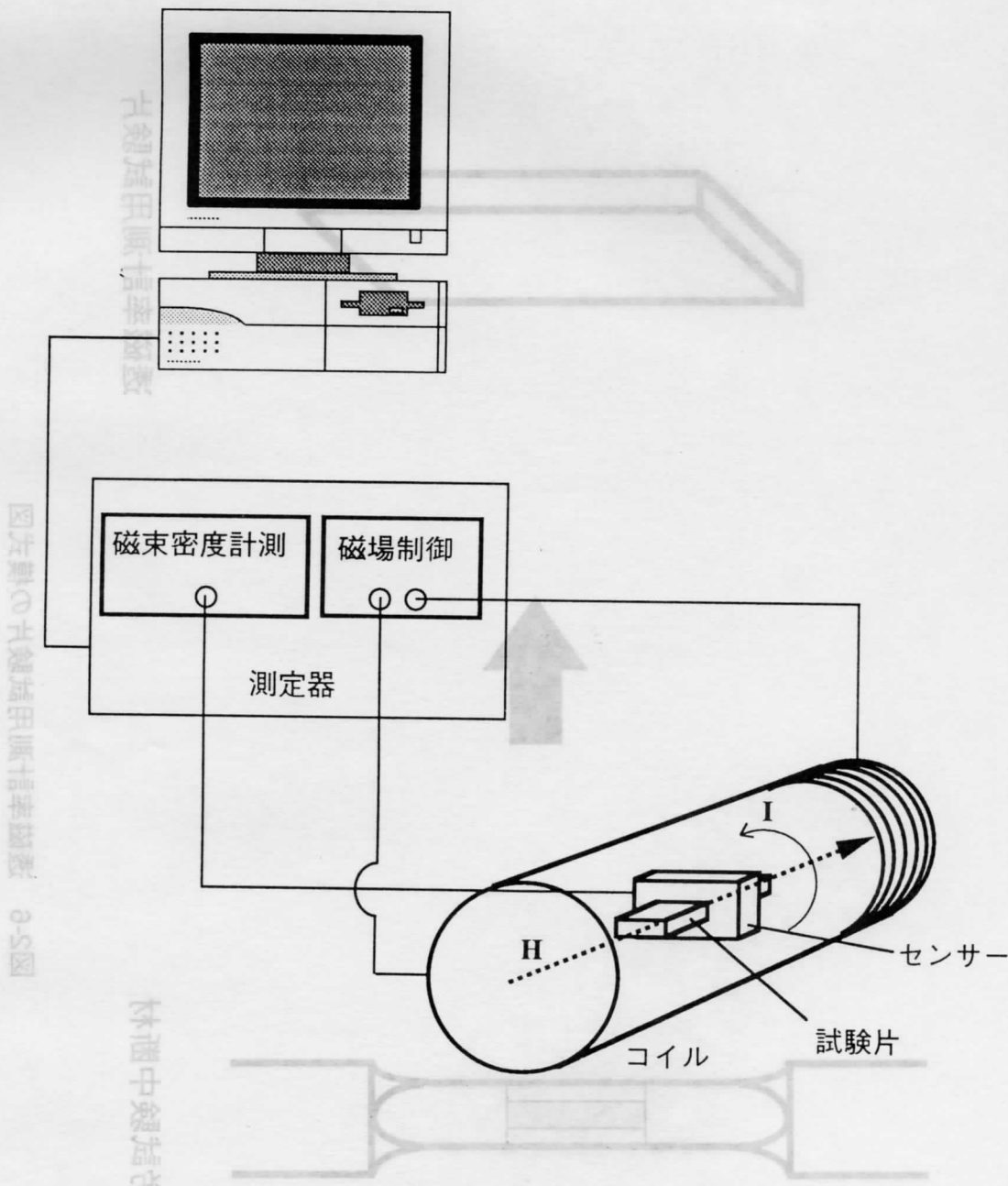


図2-7 透磁率計測装置の模式図

第3章 集中誘導型交流電位差法による疲労損傷計測可能性の検討

3-1 はじめに

集中誘導型交流電位差法 (Induced Current Focusing Potential Drop: ICFPD) は欠陥探傷手法として開発されたものであり、疲労損傷計測に適用された例はこれまでに報告されていない。しかしながら ICFPD には、疲労過程で生じる微小な表面き裂や疲労過程での材料の電磁氣的性質の変化を計測できる可能性がある。

そこで本章では、ICFPD を原子炉圧力容器用低合金鋼の疲労損傷計測に適用し、その疲労損傷の非破壊的な計測手法としての可能性を検討した。

3-2 試験片、探触子および計測方法

3-2-1 試験片および疲労損傷付与試験条件

実験に供した試験片は、20mm 角の正方形断面の平行部付き平滑試験片とした。試験片形状を図 3-1 に示す。各試験片には、種々の疲労損傷度をもつ試験片を作製する目的で 0.4%、1.0% の 2 種のひずみ範囲条件下において各レベルの疲労中断試験を実施した。それぞれの損傷材の繰返し数及び繰返し比を表 3-1 に示す。但し繰返し比は、各ひずみ範囲条件とも、試験片表面上で観察される最大き裂の長さが 3mm に達した繰返し数を N_c と定義し、 N_c に対する割合として表示した。

新材として用意したものは、疲労試験片のゲージ部と同一の形状に機械加工したものである。

3-2-2 測定探触子

本実験に用いた探触子の概略図を図 3-2 に示す。電位差を測定する端子には、図 3-2(b)に示すようなベリリウム銅に金メッキを施したスプリングコンタクトプローブを使用し、端子間隔は 5mm とした。プローブ底部には銅のコーティング厚さ 30 μm の基板を使用し、不要な銅をエッチングにより溶かし、図 3-2(c)に示すように幅 2mm で、中央部に直径 1.3mm の穴を 5mm の間隔で開けた誘導線を作製した。誘導線の長さは 20mm である。プローブ底部には絶縁物を貼り、誘導線と試験片は電氣的に絶縁されるようにした。また、電圧端子と誘導線へのリード線は直径 1.5mm のシールド線を用い、それぞれによって電流供給装置や電位差計測装置に接続した。

3-2-3 計測方法

本章で実施した計測は、日本プラントメンテナンス協会「疲労損傷計測・評価に関する調査研究委員会」（主査：東北大学庄子哲雄）におけるラウンドロビン試験の一環として行われたものであるが、その時点では 2-2-2 で示した自動計測システムが開発されていなかった。そのため、本章での計測における探触子の走査は手動により行った。測定電位差は計測器の表示により直読した。計測には、供給電流として、周波数 10kHz、1.0A の交流電流を用いた。

電位差の計測面は、探触子に備え付けられた誘導線の試験片表面への密着状態がどの計測点においても一定となるよう、試験片の中心から軸方向に左右 25mm の部分とした。電位差の計測は図 3-3 に示すように測定面上の長手方向に測定ラインを設定し、そのラインに沿って行った。測定ラインは測定面上に 2mm 間隔で計 9 本設定され、これらの測定ライン上を前記のプローブを用いて、1mm 間隔で電位差分布を測定した。すなわち、1 測定面あたり 459 地点の電位差を計測した。各試験片それぞれ 4 面全てについて計測を行った。ここではプローブ端子間の中心を測定点と定義した。新材については、両端肩部の影響が少ないと思われる範囲で同様の測定を行った。

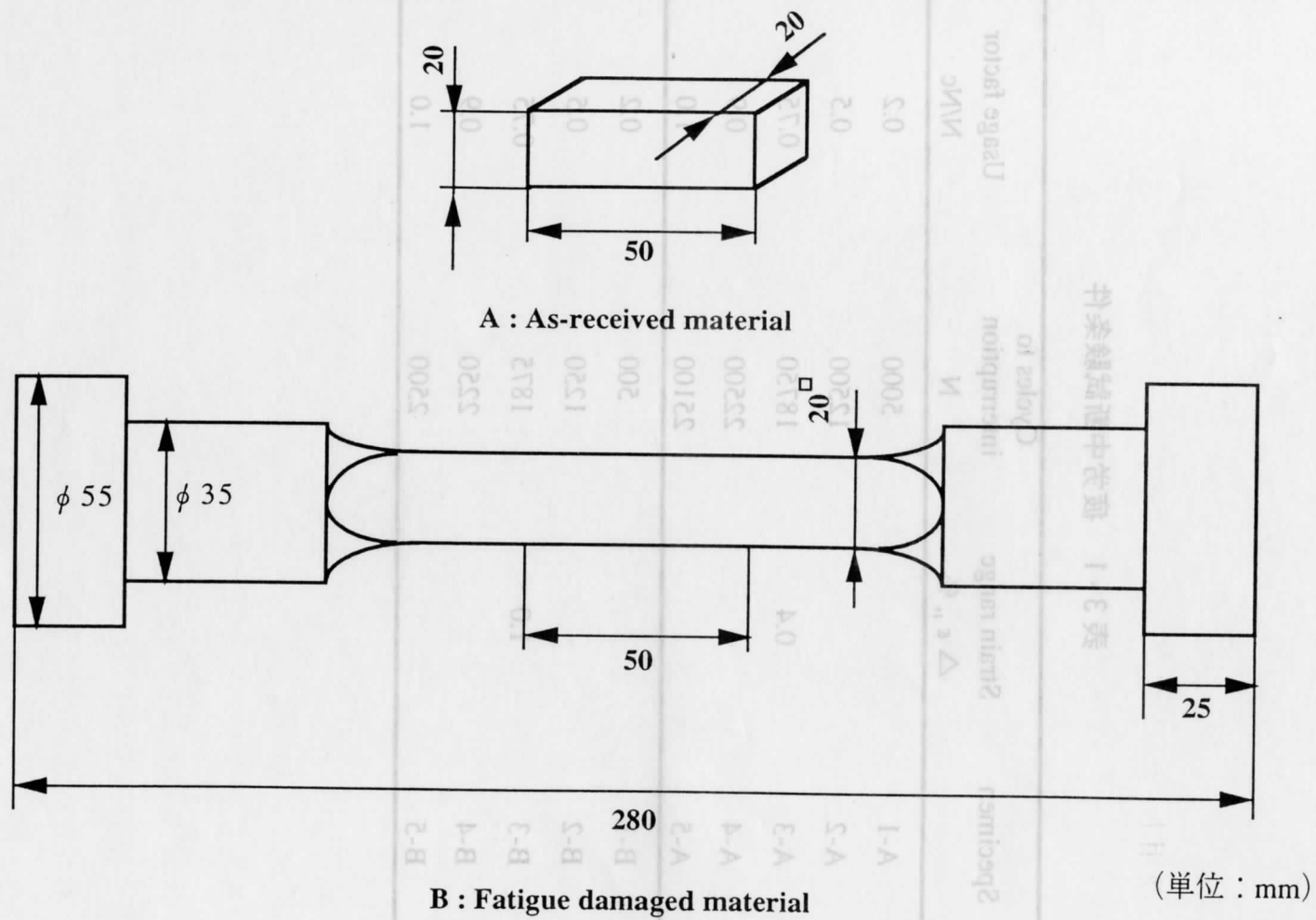
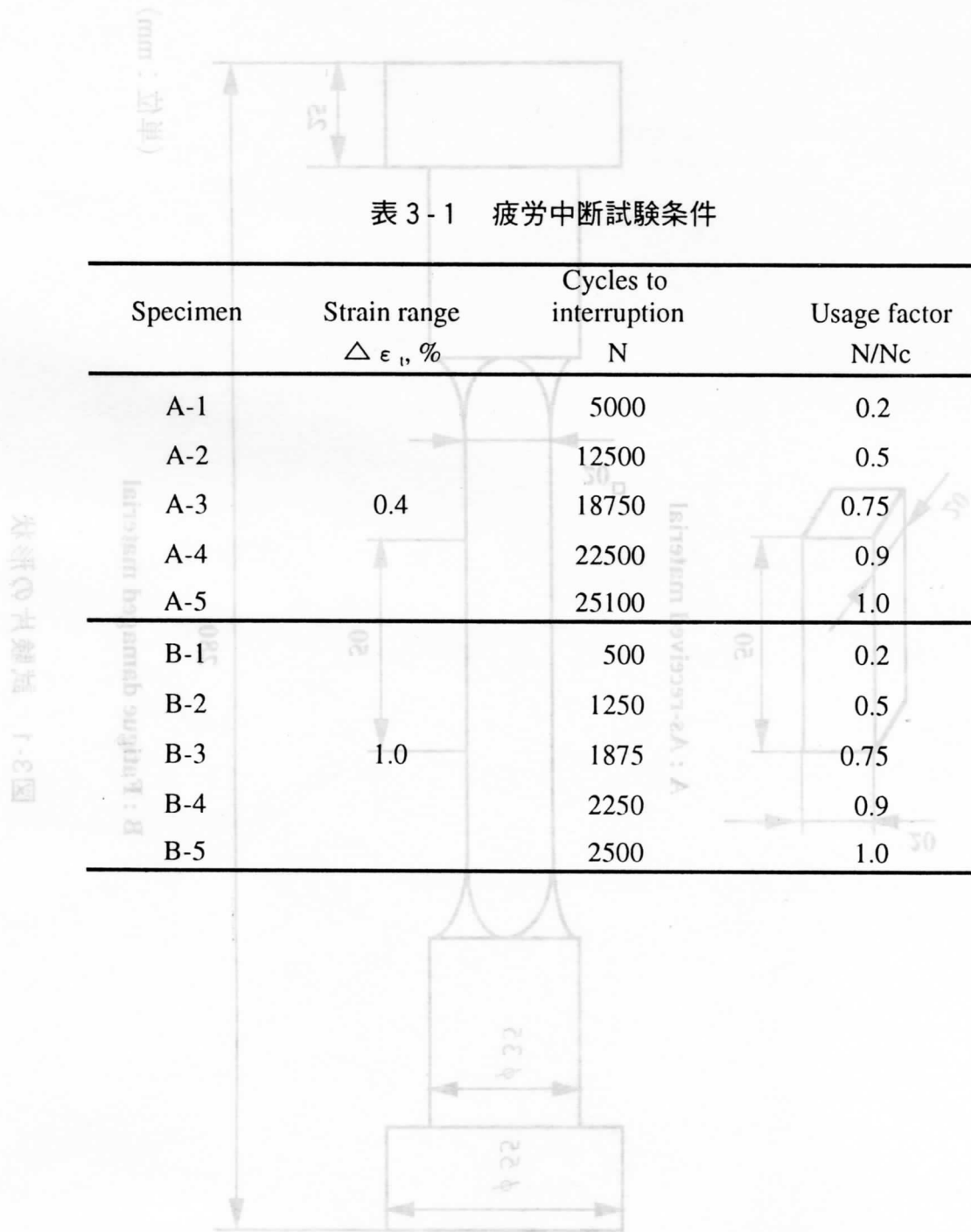


図3-1 試験片の形状



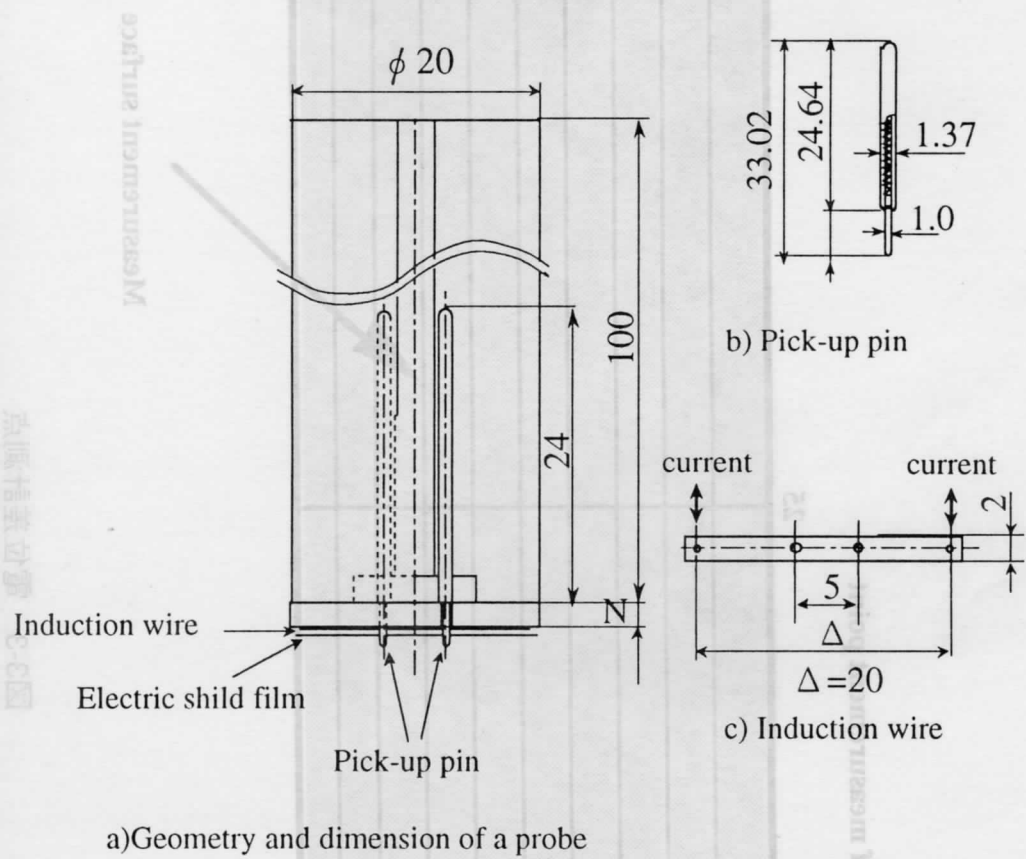


図3-2 探触子の概略図

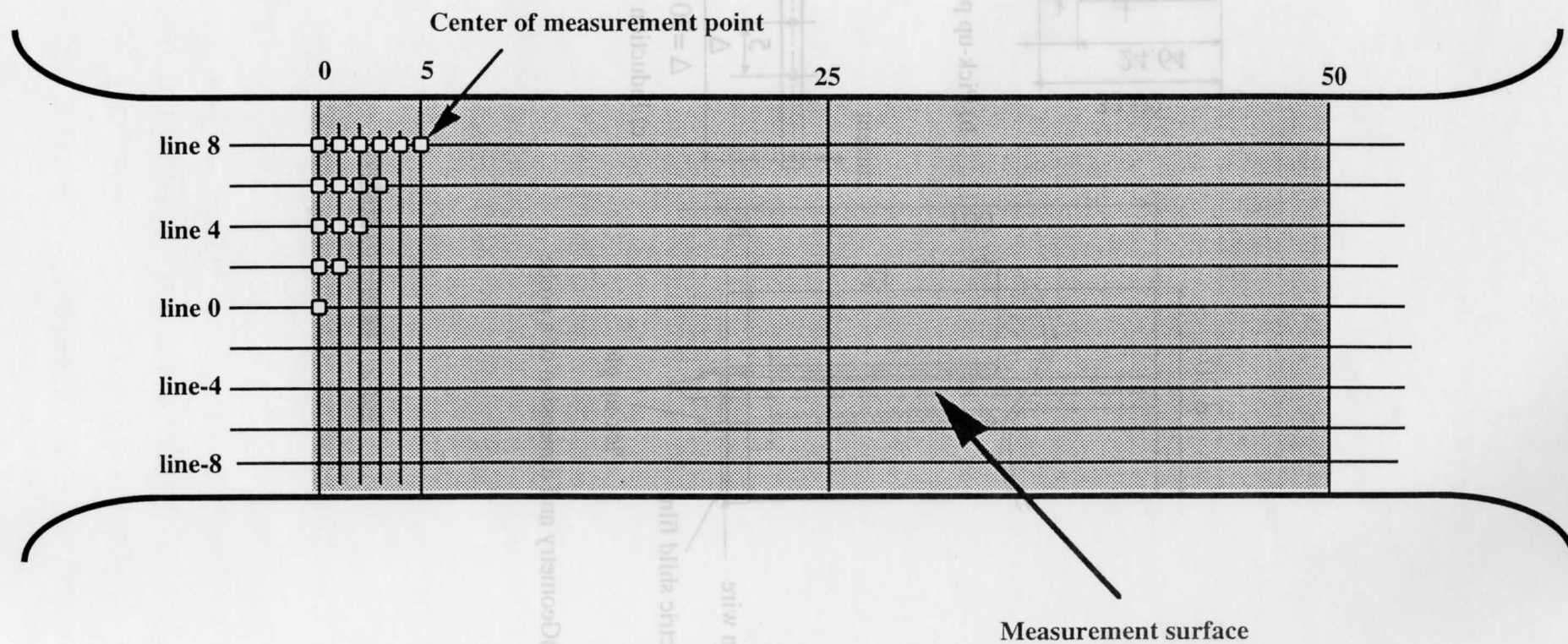


図3-3 電位差計測点

3-3 計測結果および考察

3-3-1 電位差分布と疲労繰返し数

各試験片で測定された電位差を、各測定ラインごとに新材について測定された電位差の平均値で除して規格化した。規格化された電位差を各試験片について度数分布図にしたものを図3-4に示す。図3-4(a)は新材、(b)はひずみ範囲1.0%、(c)はひずみ範囲0.4%についての結果である。

新材においては、規格化された電位差は1.0を中心として、全てのデータが0.9~1.1の間に分布しており、その範囲から外れるデータはなかった。このデータの分布は、初期に存在している材質の分布と測定誤差の双方を含んだものと考えることができる。

疲労損傷材においては、まず電位差分布の中心に着目するとひずみ範囲1.0%の結果については1.0から1.14まで、ひずみ範囲0.4%では1.12まで移動しており、両ひずみ範囲共電位差分布の中心は、繰返し比が大きくなるに従い高くなる。また、規格化電位差の分布する範囲について見るとひずみ範囲1.0%の繰返し比1.0の分布図においては0.8から1.8まで分布しており、これは新材の分布範囲の5倍もの広がりである。この傾向は繰返し比の大きい試験片程大きくなる傾向にある。さらに、ひずみ範囲1.0%の繰返し比0.75以上の試験片には、電位差の平均値から標準偏差の3倍以上も離れた高い電位差を示す部位が現れ始め、より繰返し比の大きな試験片では、それら極端に高い電位差を示す部位が顕著に増加した。これらは比較的大きな表面き裂の存在に対応しているものと推測される。次にひずみ範囲1.0%と0.4%の結果を比較する。繰返し比0.5までの結果においては、分布の中心及びばらつきなどほぼ同じような分布をしている。しかし、繰返し比0.75以上の結果では、分布の中心及び計測される最大電位差に違いが見られ、どちらもひずみ範囲1.0%の方が大きくなっている。このようにひずみ範囲の違いにより電位差の分布特性が異なっているのは、ひずみ範囲の違いに起因した疲労き裂の初生時期やその分布・密度等、損傷の局所性の違い¹⁾を反映した結果であると考えられる。ひずみ範囲別に見れば、電位差の平均値および電位差分布の標準偏差は、

繰り返し比で表される疲労損傷度との間に良い相関性を持つことが明らかである。

3-3-2 電位差分布と微視損傷

表面き裂の分布と電位差分布との対応をより詳細に調べるために、測定面からレプリカを採取し、光学顕微鏡で観察した。観察されたき裂の一例を図 3-5 に示す。き裂長さは、このようにき裂を写真上で拡大し計測した。計測された電位差とそれに対応する各計測地点に存在する表面き裂長さの関係を図 3-6 に示す。今回の表面観察はラウンドロビンによる試験片のため表面に傷が多く、レプリカ法でクラックと判断されているものは $200\ \mu\text{m}$ 程度以上のものであり、以降き裂が存在していないという表現は $200\ \mu\text{m}$ 以上の割れがないということを示す。

まず、規格化電位差が $1.0\sim 1.1$ の値を示した地点について観察を行った結果その地点でき裂の存在は確認されなかった。このような電位差の値を示す部分は図 3-4 の度数分布図に示されているように、 N/N_c が 1.0 の疲労損傷材においても存在していた。よって、このような地点ではき裂の存在はなくてもき裂初生以前に起こる転位密度の増加あるいはセル構造の形成など累積損傷を受けていることは十分考えられる。以上のことからこの領域では、き裂初生以前の累積損傷が反映されていると考えられる。次に規格化電位差が $1.1\sim 1.2$ の部分には、き裂の存在しない部分とき裂が存在している部分が観察された。規格化電位差が 1.1 未満の値を示した地点の観察では、き裂の存在が認められなかったのに対し、この領域で初めてき裂の存在が確認されたことからこの領域は、き裂の初生を反映していると考えられる。また、依然としてき裂の存在が確認されない地点も存在することからき裂の初生と合わせ累積損傷も反映されていると考えられる。規格化電位差が 1.2 を越える部分にはき裂が必ず存在することが確認された。この領域ではき裂長さが大きくなるにつれ規格化電位差が大きくなっている。このことから、計測される電位差からき裂長さを推定できる可能性のあることがわかる。

き裂の初生以前に電位差が変化する理由としては、疲労過程での転位構造の

変化に伴う材料の電磁氣的性質の変化^{2),3)}が考えられる。例えば、転位密度と電気抵抗率の関係についてはいくつかの研究^{3),4)}があり高純度の Fe では転位密度に対する電気抵抗率の増加が認められている⁴⁾。しかしながら、抵抗率についてはその変化が極めて小さいため、ここで着目すべきなのは透磁率と思われる。透磁率については、その疲労に伴う変化についてはあまり報告されていないが、疲労と似た現象である塑性変形により大きく変化することが報告されている²⁾。疲労に伴う透磁率の変化については、実際にその計測を行った。その結果については、第4章で詳しく説明する。

以上のことから、今回計測された電位差の変化にはこれらき裂の発生、成長による形状変化に加えて、疲労に伴う電磁氣的物性値の変化も寄与しているものと考えられる。

3-4 まとめ

集中誘導型交流電位差法を用いて低合金鋼の疲労損傷計測を行い、以下のことが明らかになった。

(1) 本方法により計測される電位差分布は、疲労損傷の進行に伴い変化することがわかった。このことから、疲労損傷程度を非破壊的に評価するパラメータを決定することが可能と考えられる。

(2) 規格化電位差と疲労損傷の各過程の定量的関係が得られ、

- (a) 規格化電位差 1.0~1.1 の部分は、き裂発生以前の累積疲労損傷を反映する。
- (b) 規格化電位差 1.1~1.2 の部分は、累積損傷からき裂の発生および初期進展の遷移領域を反映する。
- (c) 規格化電位差 1.2 以上の部分は、き裂進展過程を反映する。

参考文献

- 1) S.コサンダ、金属疲労の解析と応用、現代工学社(1981)
- 2) 馬越佑吉、転位観察における磁氣的性質の利用、日本金属学会会報 19-9 (1980) pp.645- 654
- 3) 紀 隆雄、転位による電子の散乱、日本金属学会会報 12 (1973) pp.631-638
- 4) L.J.Cuddy、Phil. Mag , vol.12 (1965) p.855

まず、規格化電位差が1.0~1.1の値を示した地点について観察を行った結果、その地点でき裂の存在は確認されなかった。このような電位差の値を示す部位は図3.4の度数分布図に示されているように、 N/N_c が1.0の疲労損傷材においても存在し、これを転位密度増加の転位合流等によるき裂の存在は、疲労損傷の初生以前に起こる転位密度の増加あるいはセル構造の形成など累積損傷の初期段階を示していることは十分考えられる。以上のことから、転位密度の増加は、疲労損傷の初生以前に起こる転位密度の増加の初期段階を示していると考えられる。また、規格化電位差が1.1を越える部分には、き裂の存在しない部分と、き裂が存在している部分とが観察された。規格化電位差が1.1未満の値を示した地点の観察では、き裂の存在が確認されなかった。このことから、この領域で転位密度の増加が観察された。この領域(6)は、き裂の初生を反映していると考えられる。また、依然としてき裂の存在が確認されない地点も存在することから、き裂の初生と、疲労損傷の初期段階を示していると考えられる。規格化電位差が1.2を越える部分では、き裂の存在が確認された。この領域では、き裂の長さが増加していることが確認された。このことから、計測される電位差からき裂長さを推定できる可能性のあることがわかる。

き裂の初生以前に電位差が変化する理由としては、疲労過程での転位構造の

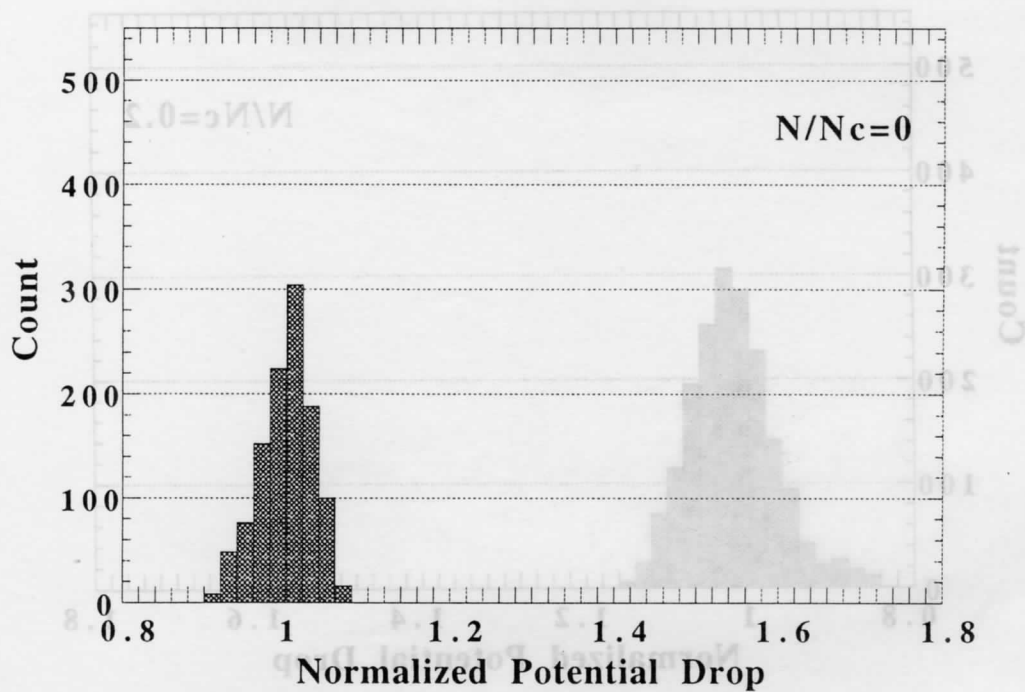


図 3-4 (a) 規格化電位差のヒストグラム ($N/N_c=0$)

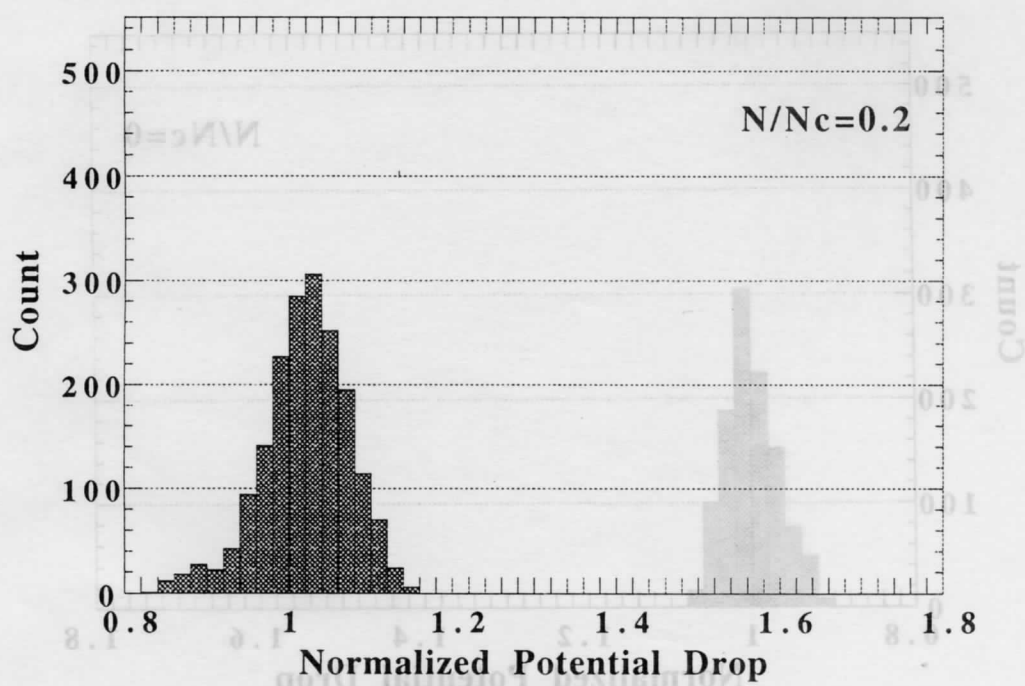
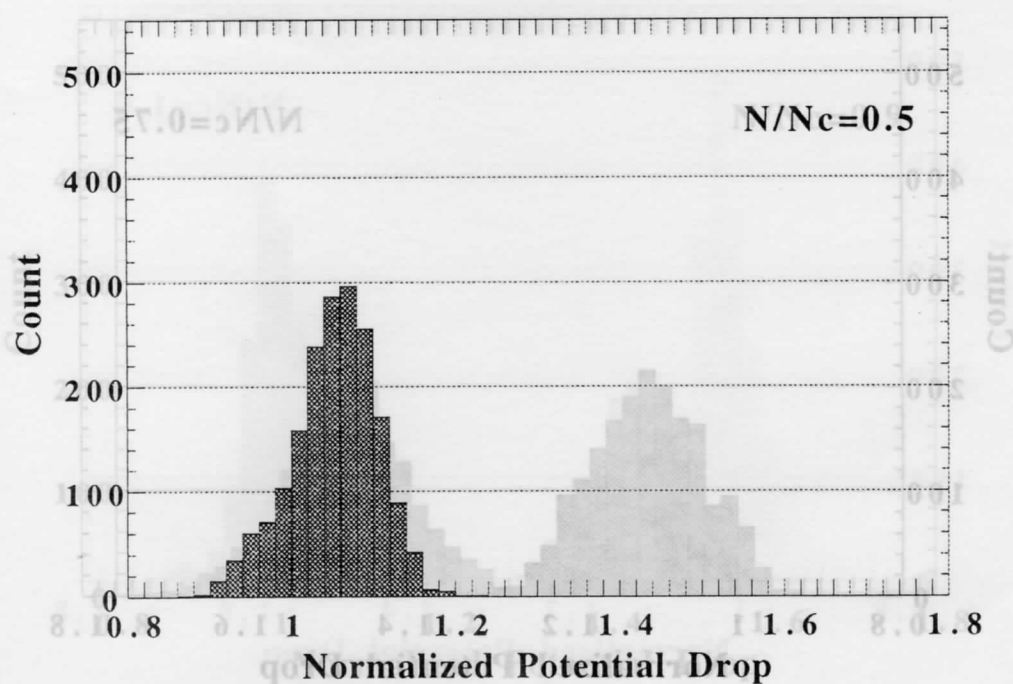


図 3-4 (b) 規格化電位差のヒストグラム(ひずみ範囲：1.0%)



(図 3-4 (b) 規格化電位差のヒストグラム (ひずみ範囲 : 1.0%))

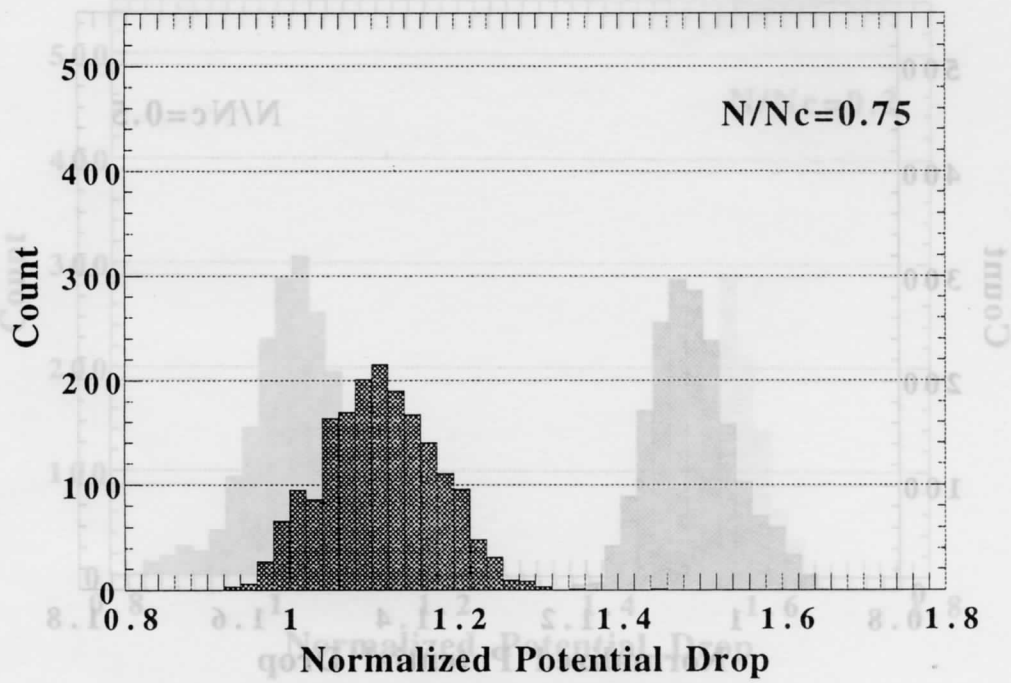


図 3-4 (b) 規格化電位差のヒストグラム(ひずみ範囲：1.0%)

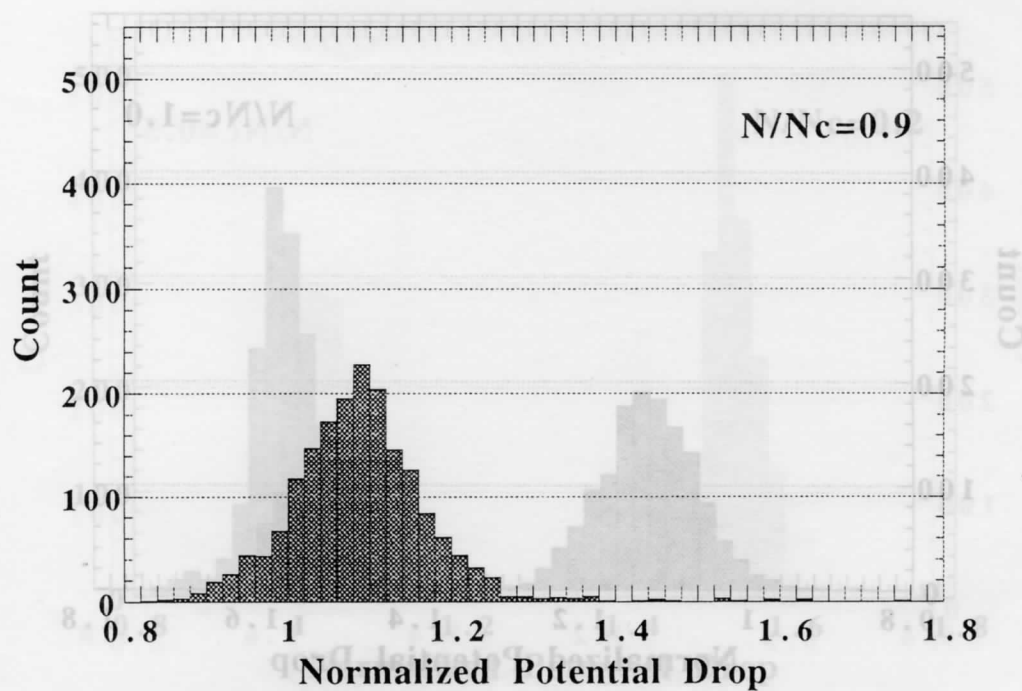


図 3-4 (b) 規格化電位差のヒストグラム(ひずみ範囲：1.0%)

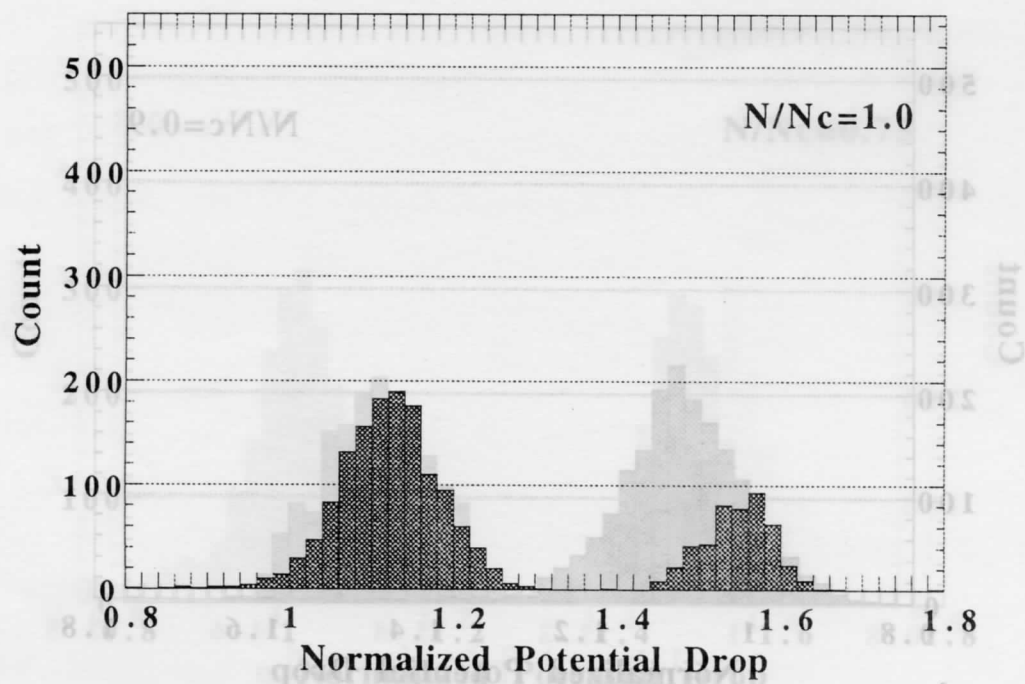


図 3-4 (b) 規格化電位差のヒストグラム(ひずみ範囲：1.0%)

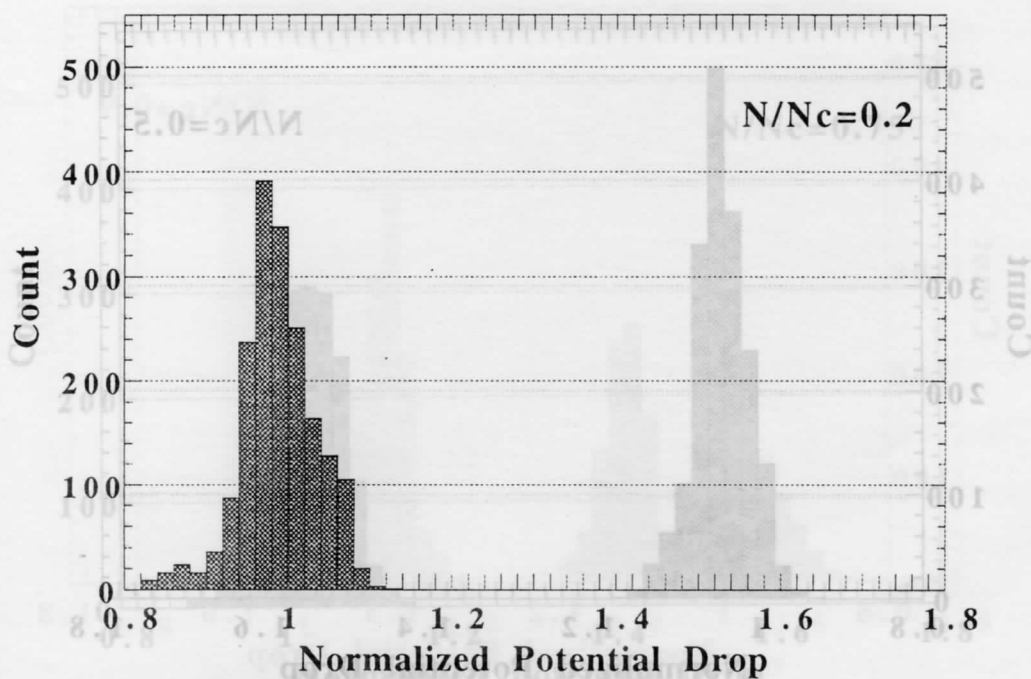


図 3-4 (c) 規格化電位差のヒストグラム(ひずみ範囲：0.4%)

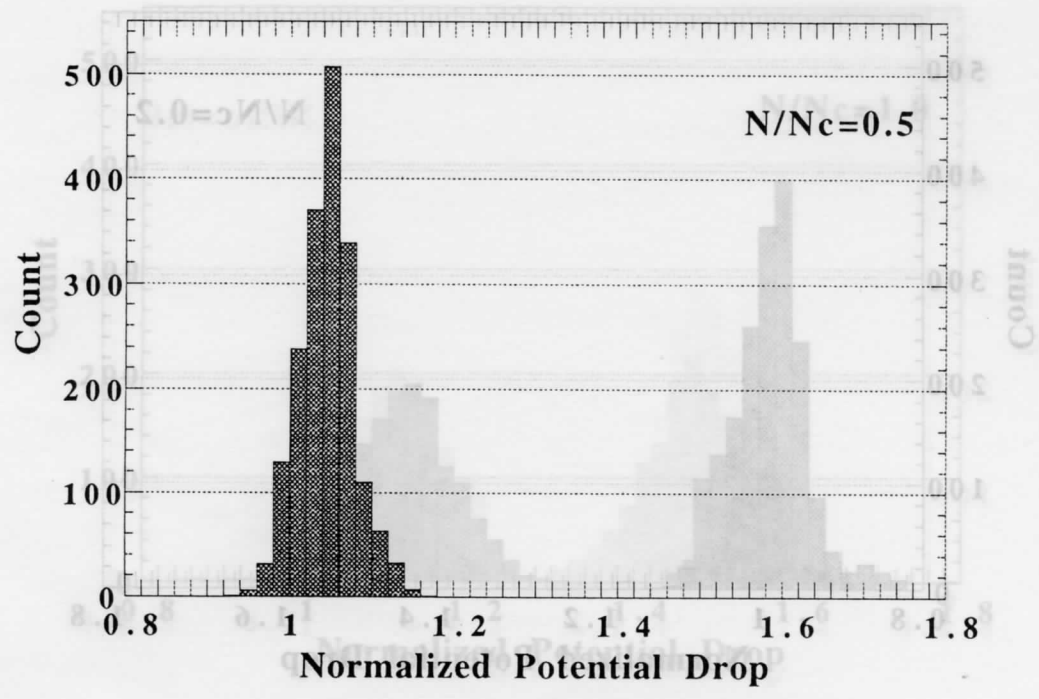


図 3-4 (c) 規格化電位差のヒストグラム(ひずみ範囲：0.4%)

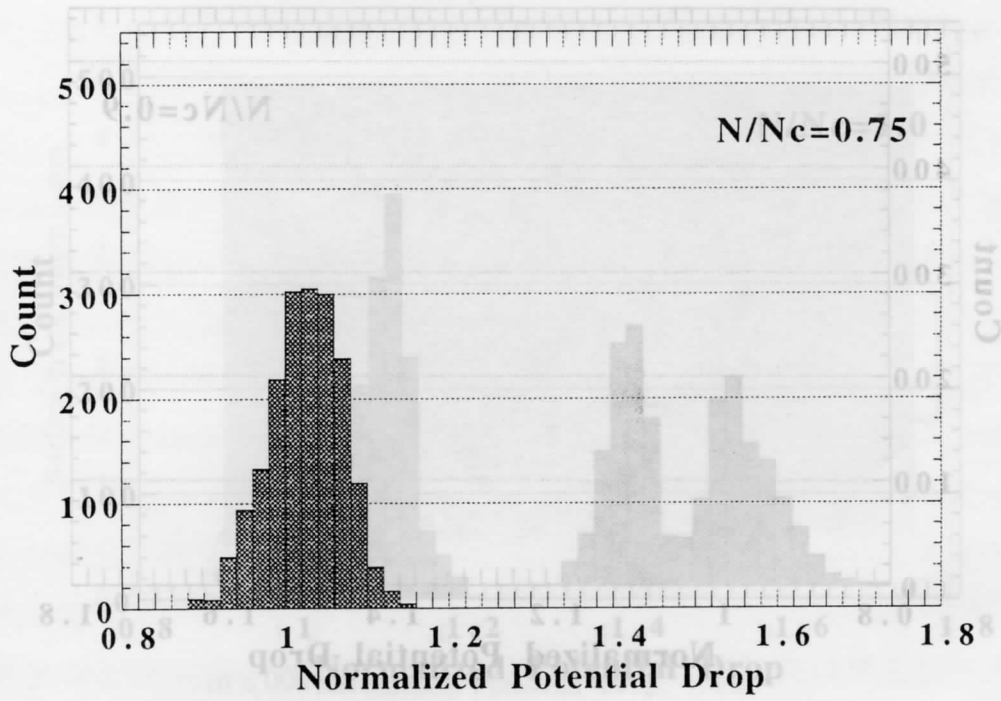


図 3-4 (c) 規格化電位差のヒストグラム(ひずみ範囲：0.4%)

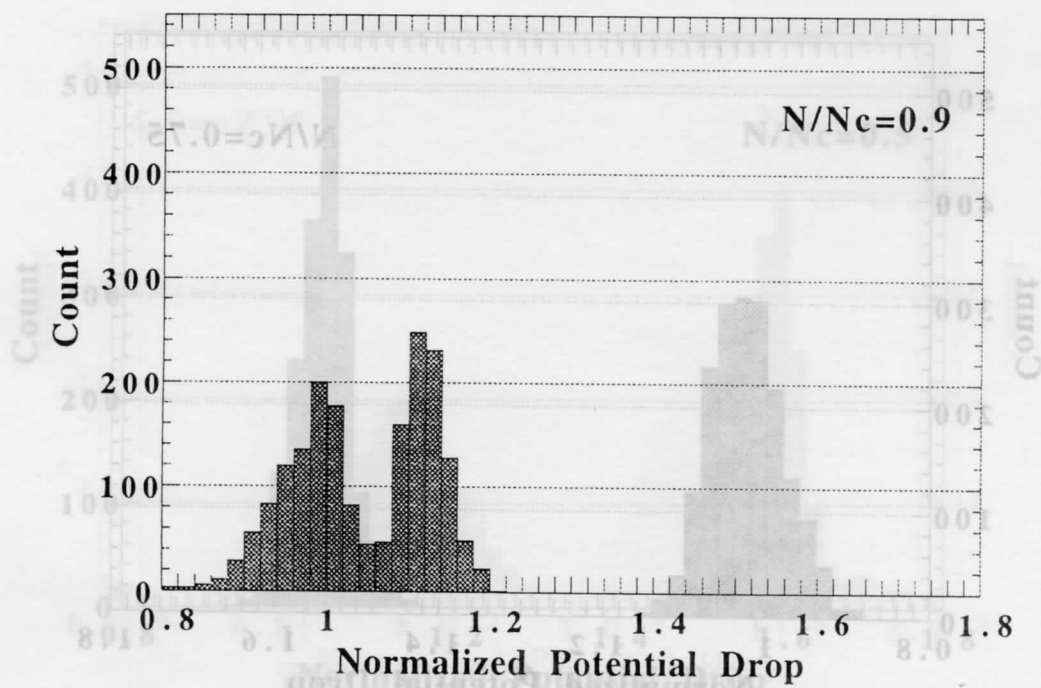


図 3-4 (c) 規格化電位差のヒストグラム(ひずみ範囲：0.4%)

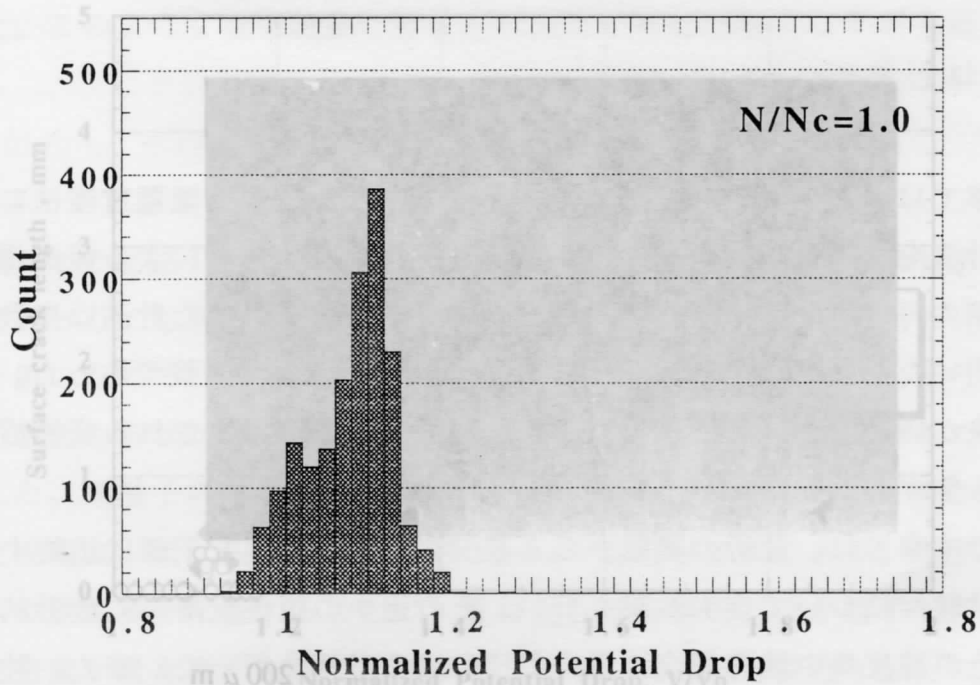


図 3-4 (c) 規格化電位差のヒストグラム(ひずみ範囲：0.4%)

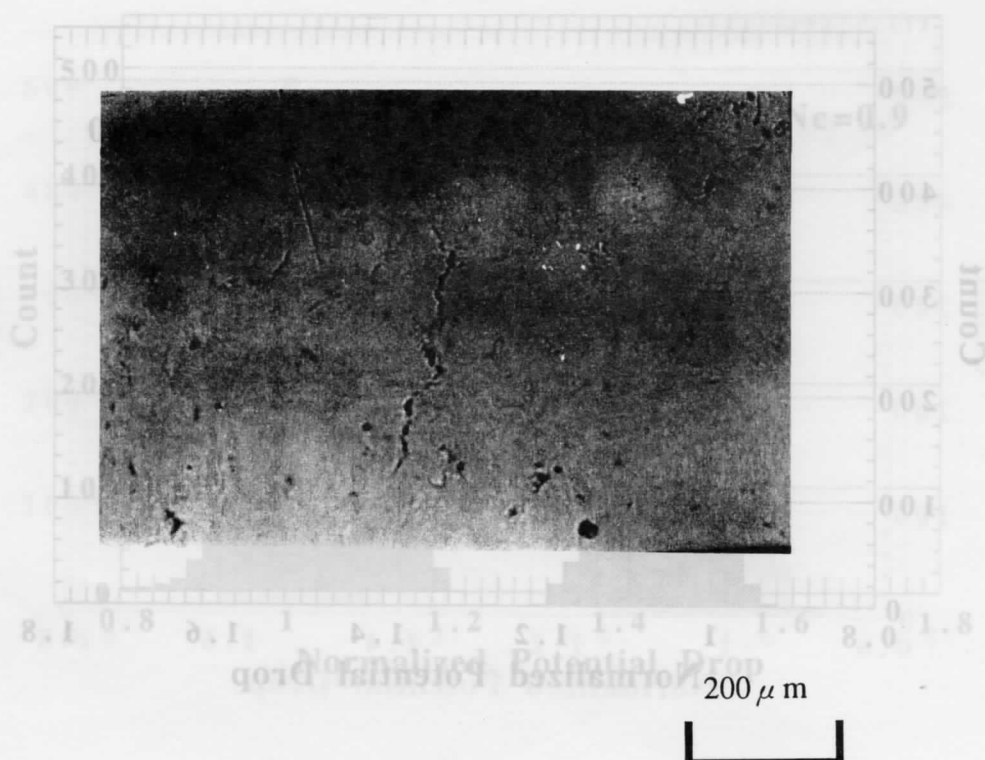


図3-5 レプリカ上で観察される疲労き裂

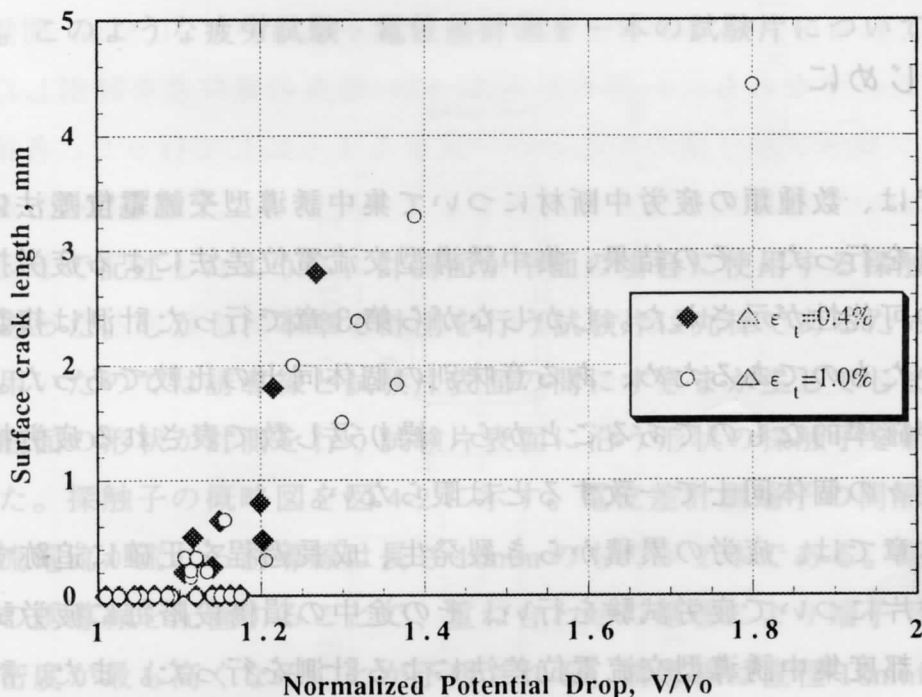


図 3-6 規格化電位差とき裂長さの関係

第4章 集中誘導型交流電位差法による疲労損傷の連続計測・評価

4-1 はじめに

第3章では、数種類の疲労中断材について集中誘導型交流電位差法による疲労損傷計測を行った。その結果、集中誘導型交流電位差法による疲労損傷の非破壊計測の可能性が示された。しかしながら第3章で行った計測は複数個の中断材を用いたものであるため、ある意味別の個体同士の比較であった。疲労という現象が確率的なものであることから、繰り返し数で表される疲労損傷度が必ずしも個々の個体同士で一致するとは限らない。

そこで本章では、疲労の累積からき裂発生、成長過程を正確に追跡するため単一の試験片について疲労試験を行い、その途中の損傷段階毎に疲労試験を中断し、その都度集中誘導型交流電位差法による計測を行った。また、計測を自動化することで測定精度の向上をはかった。

4-2 試験片、探触子および計測方法

4-2-1 試験片および疲労損傷付与試験条件

試験片の形状が角形の場合、測定ラインの位置つまり中央と端部で電位分布などが異なってしまうため計測される電位差の規格化を各測定ライン毎に行わなければならなかった。よってそのようなエッジ効果を無くし、どの地点の電位差の規格化も同一の値で行えるよう今回の試験片形状は図4-1に示されるような平行部の径10mmの平滑丸棒試験片とした。機械加工により作製した後疲労試験を実施した。負荷ひずみ範囲は1.0%とした。2-1-2で示した疲労寿命試験結果から、ひずみ範囲1.0%における本材料の疲労寿命 N_{25} は明らかになっ

ている。そこで、繰返し比 N/N_{25} が約 0.1 毎となる繰返し数 N の時点で疲労試験を中断し、試験片を疲労試験機から取り外し、電位差の計測に供した。中断試験条件を表 4-1 に示す。電位差の計測後再び疲労試験を行う際には、伸び計の取り付け位置など前回までの疲労試験とほぼ同様の状態で疲労試験を行った。このような疲労試験・電位差計測を一本の試験片について繰返し行った。

4-2-2 測定探触子

2-4-1 で記述したように、計測面が平面の場合に使用する探触子の底面は平面であった。しかし、本章で計測を行う試験片は丸棒であるため、平面用探触子を用いたのでは誘導線と試験片表面の間にすきまが生じてしまう。そこで、探触子底面の形状が計測を行う試験片表面に沿う形状の探触子を新たに設計、製作した。探触子の概略図を図 4-2 に示す。電位差計測端子の間隔は 2mm、誘導用交流電流が流れる誘導線は長さ 10mm のものが 2 本である。端子から対称に 2 本の誘導線を配置することで、重ね合わせの原理により端子下で誘導電流の電流密度が最も高くなることが予想される。誘導線は直径 10mm の試験片に沿うよう R5 の形状とし、2 本の誘導線は端子の両側に取り付けた。これにより試験片表面と誘導線とのすきまが無くなり、端子直下の試験片表面にはそれぞれの誘導線からの誘導電流が流れる仕組みになっている。プローブ底部には絶縁物を貼り、誘導線と試験片は電氣的に絶縁されるようにした。電位差計測端子は、計測時の接触抵抗を小さくし、一定な接触条件を与えるため圧縮ばねが内蔵され上下運動を可能とし、誘導線を試験片表面に密着させた時に、一定の押し付け圧になるようにした。

4-2-3 計測方法

計測は 2-2-2 で説明した自動計測システムにより自動的に走査・計測が行われた。探触子の試験片軸方向つまり測定ライン方向の移動は X 軸の制御で最小送りピッチ 0.005mm で行われる。また、測定ラインの移動つまり試験片の回転は θ 方向の制御で最小送りピッチ 0.36 度で行われる。電位差の計測面は、探触

子に備え付けられた誘導線の試験片表面への密着状態がどの計測点においても一定となるよう、試験片の中心から軸方向に左右 5mm の部分とした。電位差の計測は図 4-3 に示すように計測面上の軸方向に計測ラインを設定し、そのラインに沿って行った。計測ラインは計測面上の周方向に 14.4 度間隔で計 25 本設定し、これらの計測ライン上を前記の探触子を用いて、0.5mm 間隔で電位差を計測した。すなわち、1 回の計測で 525 地点の電位差を計測した。計測は計測点とプローブ端子間の中心とが一致するようにして行った。各損傷段階毎の計測において毎回同一地点を計測するよう配慮した。電位差の計測装置は英国の Matelect 社の汎用交流電位差測定装置である CGM5 を使い、測定電位差はコンピュータに自動的に取り込まれた。計測には供給電流として、周波数 30kHz, 1.5A の交流電流を用いた。

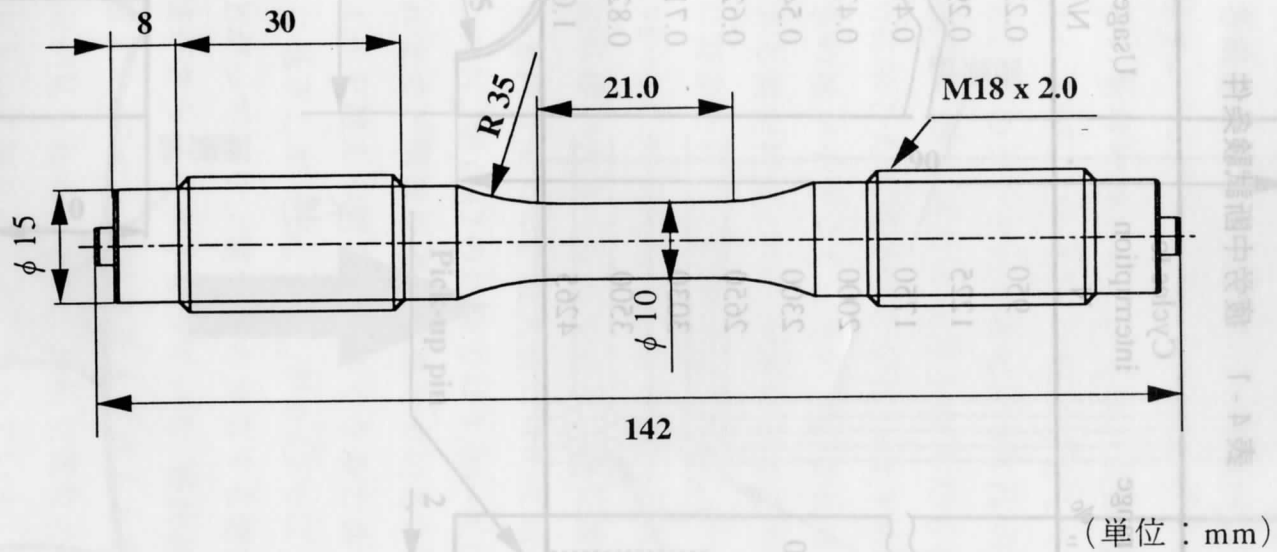


図4-1 疲労試験片形状

図4-2 共振周波数の概略図

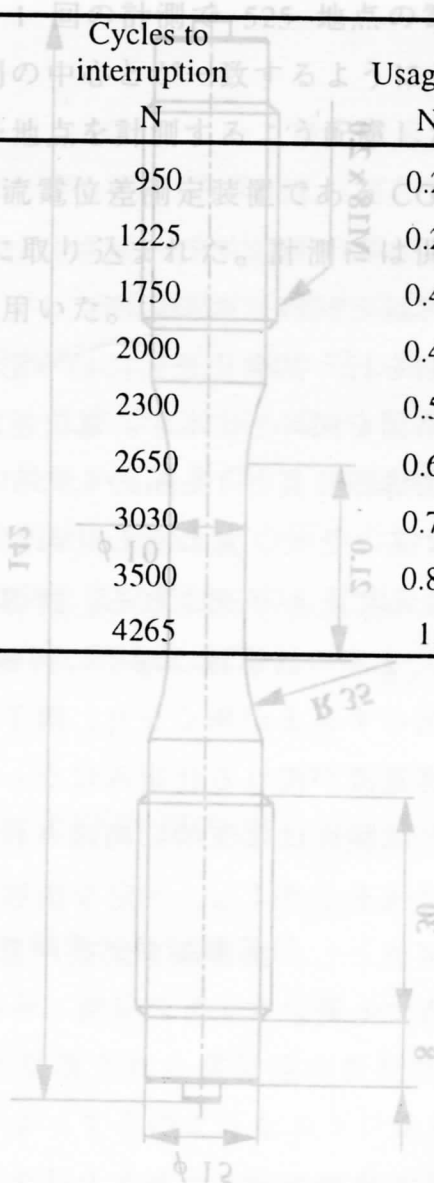
子に備え付けられた誘導線の試験片表面への密着状態がどの計測点においても一定となるよう、試験片の中心から軸方向に距離 5mm の部分とした。電位差の計測は図 4-3 に示すように計測面上の軸方向に計測ラインを設定し、そのラインに沿って行った。計測ラインは計測面上の軸方向に 14.4 度間隔で計 25 本設定し、これらの計測

表 4-1 上 疲労中断試験条件

用いて、0.5mm 間隔で電位

表 4-1 疲劳中断試験条件

Strain range $\Delta \epsilon$, %	Cycles to interruption N	Usage factor N/N ₂₅
1.0	950	0.22
	1225	0.29
	1750	0.41
	2000	0.47
	2300	0.54
	2650	0.62
	3030	0.71
	3500	0.82
	4265	1.0



4-3 計測結果および考察

4-3-1 電位差分による疲労損傷の検出

各損傷段階で測定された電位差は、新材について測定された電位差の平均値で除して規格化した。各損傷段階に規格化された電位差を複数分布図にしたものを図4-4(a)~(j)に示す。

疲労試験を実施する前の新材の時点においては、規格化された電位差は1.0を示し、全てのデータが0.9~1.05の間に分布しており、その範囲から外れたデータはなかった。

このデータの分布は図4-5(a)の結果と同様に、初期に存在している材質の不均質性の電位差の双方を含んだ分布を示している。しかし、図4-3(a)に示した電位差分布が0.9~1.1の範囲を持つに比べて、ばらつきの幅が小さくなってきている。これは、計測に自動計測システムを用いたことによる測定精度の向上が原因と考えられる。

疲労損傷を与えた後に計測を行った結果では、図4-5(b)に示すように最も度数が高い電位差の値は0.98~1.0に集中している。これは、図4-3(b)の電位差を示す分布が疲労損傷度の増加に伴い大きくなっている。電位差が0.9~1.0の範囲についてはほぼ同じ分布を持っている。最大値は1.06で、これは、図4-3(b)の電位差を示す分布が疲労損傷度の増加に伴い小さくなっている。

図4-3(c)の電位差を示す分布が疲労損傷度の増加に伴い小さくなっている。最大値は1.06で、これは、図4-3(b)の電位差を示す分布が疲労損傷度の増加に伴い小さくなっている。最大値は1.06で、これは、図4-3(b)の電位差を示す分布が疲労損傷度の増加に伴い小さくなっている。

図4-3(d)の電位差を示す分布が疲労損傷度の増加に伴い小さくなっている。最大値は1.06で、これは、図4-3(b)の電位差を示す分布が疲労損傷度の増加に伴い小さくなっている。最大値は1.06で、これは、図4-3(b)の電位差を示す分布が疲労損傷度の増加に伴い小さくなっている。

図4-3(e)の電位差を示す分布が疲労損傷度の増加に伴い小さくなっている。最大値は1.06で、これは、図4-3(b)の電位差を示す分布が疲労損傷度の増加に伴い小さくなっている。最大値は1.06で、これは、図4-3(b)の電位差を示す分布が疲労損傷度の増加に伴い小さくなっている。

図4-3(f)の電位差を示す分布が疲労損傷度の増加に伴い小さくなっている。最大値は1.06で、これは、図4-3(b)の電位差を示す分布が疲労損傷度の増加に伴い小さくなっている。最大値は1.06で、これは、図4-3(b)の電位差を示す分布が疲労損傷度の増加に伴い小さくなっている。

図4-3(g)の電位差を示す分布が疲労損傷度の増加に伴い小さくなっている。最大値は1.06で、これは、図4-3(b)の電位差を示す分布が疲労損傷度の増加に伴い小さくなっている。最大値は1.06で、これは、図4-3(b)の電位差を示す分布が疲労損傷度の増加に伴い小さくなっている。

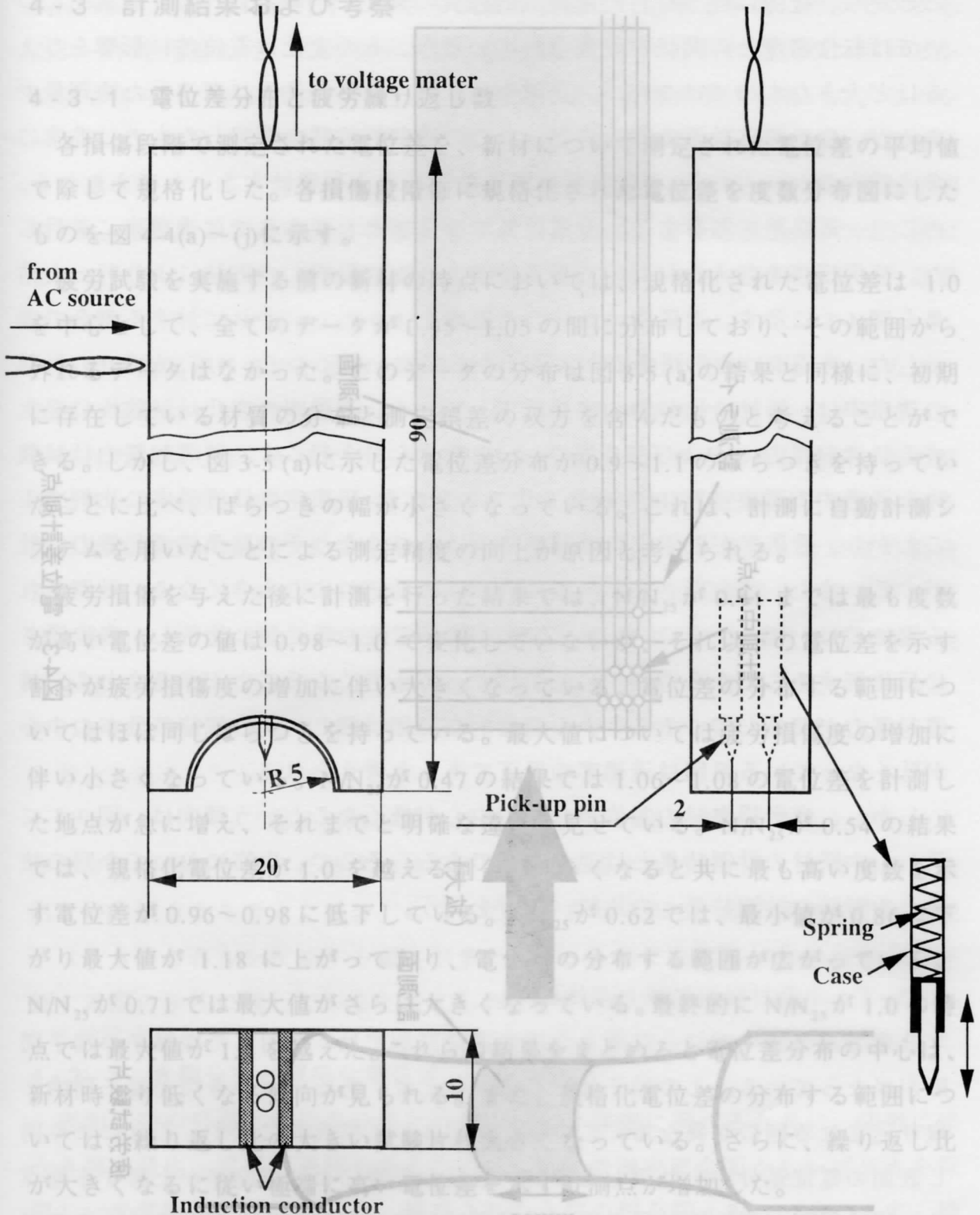


図4-2 丸棒用探触子の概略図

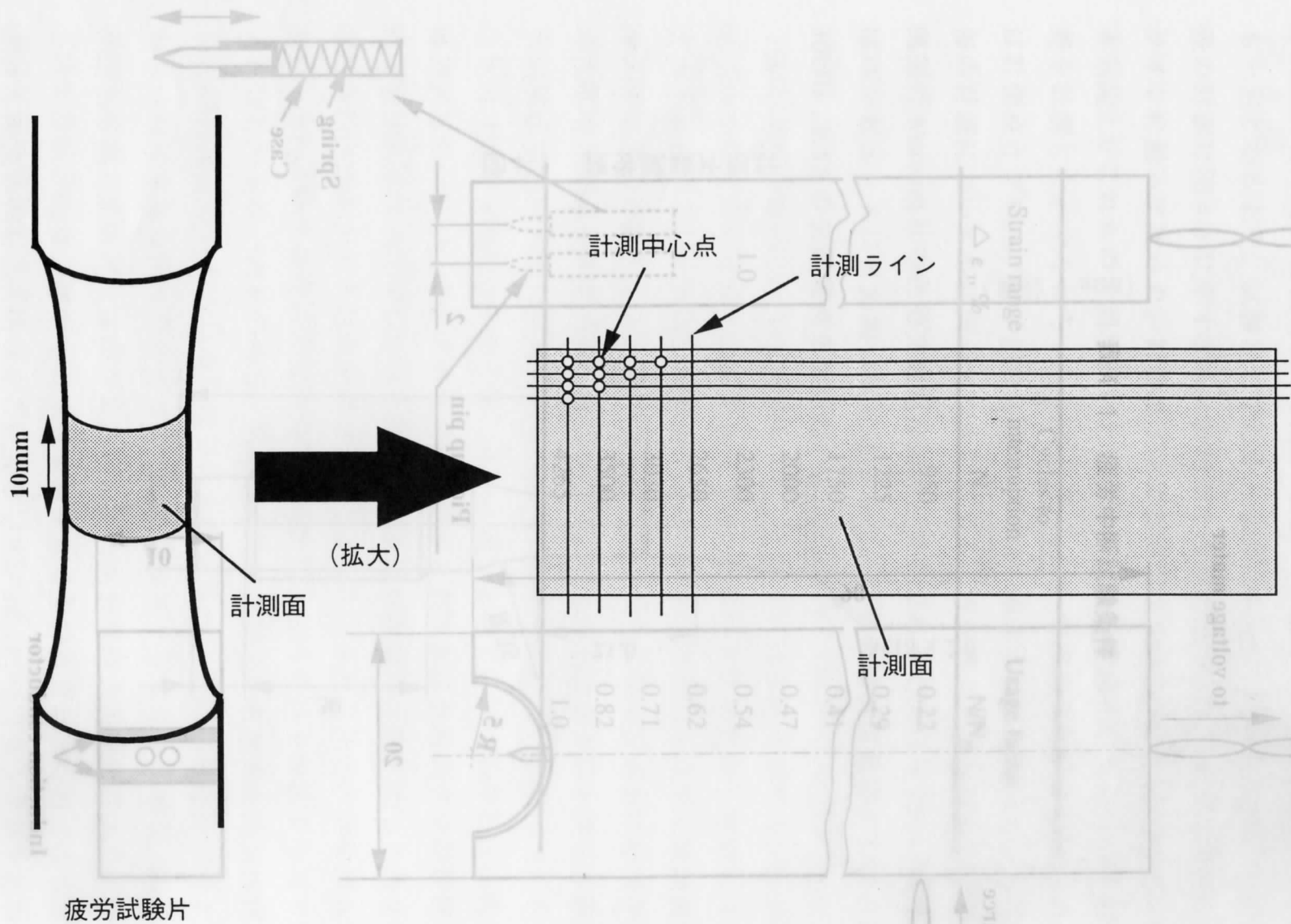


図4-3 電位差計測点

4-3 計測結果および考察

4-3-1 電位差分布と疲労繰返し数

各損傷段階で測定された電位差を、新材について測定された電位差の平均値で除して規格化した。各損傷段階毎に規格化された電位差を度数分布図にしたものを図4-4(a)~(j)に示す。

疲労試験を実施する前の新材の時点においては、規格化された電位差は1.0を中心として、全てのデータが0.95~1.05の間に分布しており、その範囲から外れるデータはなかった。このデータの分布は図3-5(a)の結果と同様に、初期に存在している材質の分布と測定誤差の双方を含んだものと考えることができる。しかし、図3-5(a)に示した電位差分布が0.9~1.1のばらつきを持っていたことに比べ、ばらつきの幅が小さくなっている。これは、計測に自動計測システムを用いたことによる測定精度の向上が原因と考えられる。

疲労損傷を与えた後に計測を行った結果では、 N/N_{25} が0.41までは最も度数が高い電位差の値は0.98~1.0で変化していないが、それ以下の電位差を示す割合が疲労損傷度の増加に伴い大きくなっている。電位差の分布する範囲についてはほぼ同じばらつきを持っている。最大値については疲労損傷度の増加に伴い小さくなっている。 N/N_{25} が0.47の結果では1.06~1.08の電位差を計測した地点が急に増え、それまでと明確な違いを見せている。 N/N_{25} が0.54の結果では、規格化電位差が1.0を越える割合が大きくなると共に最も高い度数を示す電位差が0.96~0.98に低下している。 N/N_{25} が0.62では、最小値が0.86に下がり最大値が1.18に上がっており、電位差の分布する範囲が広がっている。 N/N_{25} が0.71では最大値がさらに大きくなっている。最終的に N/N_{25} が1.0の時点では最大値が1.4を越えた。これらの結果をまとめると電位差分布の中心は、新材時より低くなる傾向が見られる。また、規格化電位差の分布する範囲については、繰返し比の大きい試験片程大きくなっている。さらに、繰返し比が大きくなるに従い極端に高い電位差を示す計測点が増加した。

疲労損傷を与えた後に計測される電位差分布の中心が、新材時の結果より低くなっている原因としては、その変化が疲労損傷の初期の段階から現れている

ことから、疲労に伴う材料の電磁氣的性質の変化¹⁾が考えられる。抵抗率については転位密度との関係が報告されているが、その変化は電位差に影響を与えるほど大きなものではない²⁾。透磁率は材料の磁氣的性質に関連した物理量であるが、疲労損傷計測の研究においてこの磁氣的性質を利用したものは非常に多く報告されており³⁾、その変化が電位差に与える影響は大きいと考えられる。そこで、電位差に影響を与える電磁氣的物性値としてここでは透磁率に着目した。疲労損傷を与えた材料の透磁率計測を2-4で説明した方法により行った結果を図4-5に示す。透磁率は新材の透磁率を1.0とし、それに対する割合で表示した。透磁率は疲労損傷度が大きくなるに従い低くなり、 N/N_{25} が1.0の材料の透磁率は、新材に比べ約20%程低下している。透磁率の変化は試験片に発生する誘導起電力(e)および表皮厚さ(δ)の変化を引き起こす。誘導起電力は試験片を通過する磁束密度(B)の時間変化で表される。磁束密度は透磁率に比例することから、透磁率が低下すれば磁束密度は小さくなりその結果誘導起電力は低下する。また、表皮厚さについては透磁率の低下により大きくなる。計測される電位差は、図2-3中に示した式により誘導電流の電流値に比例し、表皮厚さに反比例することから透磁率の低下によって小さくなることが予想される。誘導起電力が関係してくることから定量的な評価は難しいが、電位差分布の中心が低くなっている原因は透磁率の低下であると考えられる。

しかし、疲労損傷材の電位差分布の中心が低くなるという傾向は、図3-5に示した中断材の計測結果とは逆の傾向である。そこで、次節において今回の結果と中断材の計測結果との比較、検討を行う。

4-3-2 中断材計測結果との比較

3章で述べた中断材の計測と今回の連続計測では、使用した探触子の端子間隔が異なっている。この端子間隔の違いにより、ある一つのき裂が端子間内に取り込まれる回数が異なる。この様子を図4-6に模式的に示す。これにより同じ表面の電位差分布を計測した際に、き裂の影響により電位差が上昇する地点は、端子間隔が広い探触子の方が端子間隔が狭い探触子より多くなる。この点を確認するために、次のような作業を行った。まず、中断材($\Delta \epsilon_f = 1.0\%$ 、

$N/N_c=1.0$) の表面に存在するき裂を試験片表面に対応する平面にマッピングしたシートを用意した。このシートは、本材料について行われたラウンドロビン試験で得られた極間式蛍光湿式磁粉探傷法による計測結果⁴⁾を用いた。このシート上に、電位差計測と同じ計測点を設定し、端子間隔 5mm と 2mm の探触子で計測を行った時に端子間内にき裂が含まれる回数を調べた。この結果端子間隔 5mm の探触子の端子間にき裂が含まれる回数は、端子間隔 2mm の 2.5 倍になることがわかった。これは、端子間隔の比が 5:2 であることを反映した結果である。

前節の結果から疲労の進行に伴う透磁率の低下により電位差は小さくなり、き裂の存在により電位差は上昇する。よって、端子間隔の広い探触子を用いた中断材の計測では、き裂によって電位差が上昇した地点の割合が連続計測の結果に比べ 2.5 倍も多くなり、端子間隔の狭い探触子を用いた連続計測では、き裂の存在しない地点つまり透磁率の低下により電位差が減少した地点の割合が多くなることが予想される。この点から予想される電位差分布の変化を模式的に表したものを図 4-7 に示す。き裂の検出回数の違いにより電位差分布の変化に違いが出るのがわかる。中断材計測と連続計測の度数分布図において、その分布の中心が異なる変化を見せた一因は、この端子間隔の相違によるものと考えられる。

以上のことから、端子間隔が狭い探触子を用いた場合き裂が存在しない地点つまり累積損傷を受けた地点の結果を大きく反映することから、累積損傷の検出という観点から考えた場合、こちらの方が有効である。端子間隔が広い探触子は、き裂の存在を反映する頻度が多いので、き裂に着目して疲労損傷度を評価する際の手法に適していると考えられる。

4-3-3 き裂分布と規格化電位差

表面き裂の分布と電位差分布との対応をより詳細に調べると共に、疲労に伴うき裂の発生・成長の過程を見るために、電位差測定面全面からレプリカを採取し、光学顕微鏡で観察した。観察されたき裂の例を図 4-8(a)~(d)に示す。繰り返し比の増加に伴うき裂長さの変化の数例を図 4-9 に示す。今回のレプリカ観察では最小 70 μm のき裂まで観察されたことより以降き裂が存在していな

いという表現は $70\ \mu\text{m}$ 以上の割れがないということを示す。き裂の存在が確認されたのは、繰返し比が 0.47 以上の時点においてのみであった。よって、 $70\ \mu\text{m}$ 以上のき裂の発生寿命を繰返し比 0.47 の時点とする。その後繰返し比の増加に伴いき裂の数が増えると同時に、すでに発生したき裂は 2 通りの挙動を示し、すなわち繰返し比の増加に伴い大きくなるものと、停滞するものにわかれた。表面に発生したき裂の最大長さやき裂密度と疲労損傷度との間に何らかの相関を見い出すことが期待される。

次に、1mm 以下の微小き裂についてき裂長さと電位差の関係を図 4-10 に示す。図 4-11 には、図 4-10 中の各地点毎のデータを線で結んだ図を示す。き裂の発生が起きなかった地点の電位差は、どの地点の電位差も繰返し比が大きくなるに従い低下しており、疲労寿命の時点においては、新材の時点で計測された電位差より約 10% 程低下している。これは図 4-5 に示した透磁率の低下によるものと考えられる。微小なき裂が存在している地点の電位差は、き裂が発生するまではき裂の存在しない地点の電位差と同様の傾向を示し、き裂の発生後電位差は上昇し、き裂の存在していない地点の電位差より大きくなる傾向にある。しかしながら、計測時の繰返し比に依存しない規格化電位差とき裂長さとの相関性は、微小なき裂になるほど得られなかった。これは、微小なき裂が電位差に与える影響が、透磁率など材料の電磁氣的物性値に比べ小さいことに起因するものであると考えられる。

4-3-4 集中誘導型交流電位差法による疲労損傷の評価

本節では、集中誘導型交流電位差法による疲労損傷の評価を行う際のパラメータについて検討し、それを提案する。前節までの結果から、本方法による疲労損傷材の計測によりその電位差分布は疲労き裂の発生・進展に伴う電位差の上昇と、透磁率の低下に伴う電位差の低下という相反する 2 つの現象を含むことが判明した。すなわち電位差の変化は初期の累積損傷段階では電位差は低下し、き裂の発生・成長により上昇することが期待される。すなわち図 4-12 に模式的に示すような挙動を示すことが予想される。よって、疲労損傷程度の評価を行う際には、これらを十分に考慮して考えなければならない。そこで、図 4-13 に示すような疲労損傷程度の評価線図を提案する。図には、各 N/N_{25} の値の損

傷段階においてそれぞれき裂の発生が起きなかった地点の電位差の平均値 (V_{no})と各損傷段階毎に計測された電位差の最大値 (V_{max})を合わせて表示した。き裂のない地点の電位差は、透磁率の変化のみを反映し、繰返し比の増加に伴い低下している。図 4-5 で示したように、透磁率と繰返し比で表される疲労損傷程度の間には良好な相関性が見られるので、このき裂が存在しない地点の電位差を疲労損傷程度の評価に用いることは有効であると考えられる。但し、本論文ではき裂がないという定義はつまり、 $70\ \mu\text{m}$ 以上の割れがないということである。電位差の最大値は、き裂発生寿命である繰返し比 0.47 の時点までは同様の傾向を示すが、それを越えると繰返し比の増加に伴い大きくなる。これは電位差の最大値が表面に存在する最大き裂長さを反映することに起因する。き裂発生以後、疲労損傷度と良好な相関性を持ち、き裂がない地点での電位差パラメータとは異なる変化をし、この最大値により疲労損傷のき裂発生以降の評価が可能である。以上のことから、き裂の存在しない地点の電位差により、 $70\ \mu\text{m}$ 以上のき裂発生前の累積損傷段階の評価を行うことが可能であり、き裂発生寿命後には、計測される電位差の最大値に着目することで疲労損傷評価を行うことが可能と考える。

4-4 まとめ

集中誘導型交流電位差法による疲労損傷の評価法の開発を目的として、単一の試験片について疲労損傷を与え、各損傷段階毎に連続して、同一地点において疲労損傷の計測を行い、その電位差分布及び疲労き裂との対応などを検討し、以下の知見を得た。

(1) 計測される電位差分布は、疲労損傷度の増加に伴い生じる透磁率の低下及び疲労き裂の発生・成長を反映し変化する。

(2) 計測に用いる探触子の端子間隔が狭いものは、き裂発生以前の累積損傷を受けた地点の結果を反映する頻度が大きいので、累積損傷の非破壊的な検出に適している。

(3) き裂が存在しない地点の電位差は、透磁率の変化を受け疲労損傷の進行に伴い低下する。

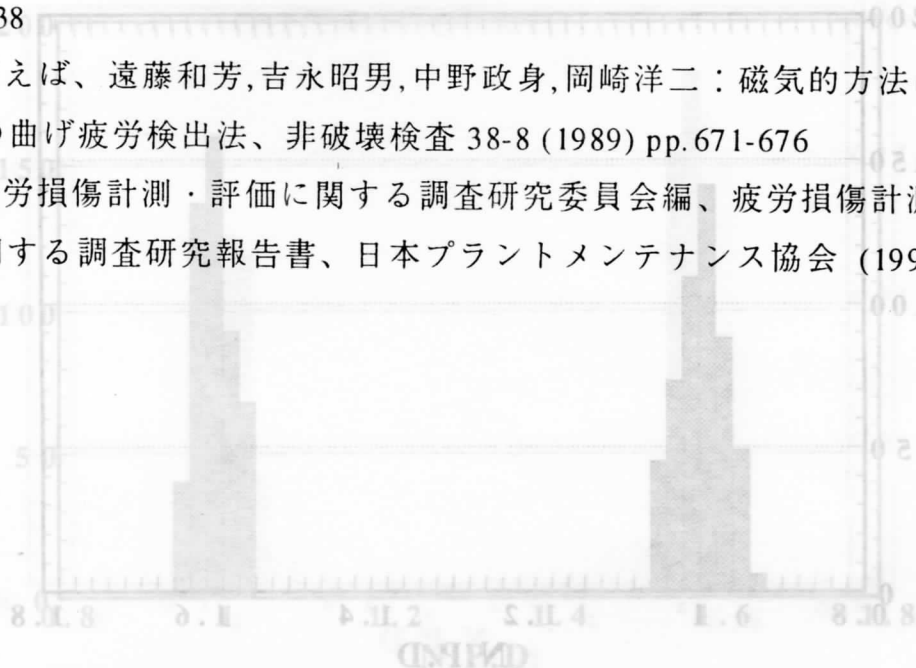
(4) 計測時の疲労損傷程度別には、発生した疲労き裂の表面長さと規格化電位差の間に相関性が見られた。このことから、規格化電位差から表面長さを推定できる可能性が示された。

(5) $70\ \mu\text{m}$ 以上のき裂の存在がない地点の電位差変化に着目することで、き裂発生以前の累積損傷の評価が可能となり、き裂発生後の疲労損傷評価は、計測される電位差の最大値に着目することで可能となる。これらを組み合わせることで、集中誘導型交流電位差法による疲労損傷程度の非破壊的な評価が可能である。

本節では、集中誘導型交流電位差法による疲労損傷の評価を行う際のパラメータについて検討し、それを提案する。前節までの結果から、本方法による疲労損傷材の計測によりその電位差分布は疲労き裂の発生・進展に伴う電位差の上昇と、透磁率の低下に伴う電位差の低下という相反する2つの現象を含むことが判明した。すなわち電位差の変化は初期の累積損傷段階では電位差は低下し、き裂の発生・成長により上昇することが期待される。すなわち図4-12に模式的に示すような挙動を示すことが予想される。よって、疲労損傷程度の評価を行う際には、これらを充分に考慮して考えなければならない。そこで、図4-13に示すような疲労損傷程度の評価線図を提案する。図には、各 N_{max} の値の損

参考文献

- 1) 馬越佑吉、転位観察における磁氣的性質の利用、日本金属学会会報 19-9、(1980) pp.645- 654
- 2) 紀 隆雄、転位による電子の散乱、日本金属学会会報 12 (1973) pp.631-638
- 3) 例えば、遠藤和芳,吉永昭男,中野政身,岡崎洋二：磁氣的方法による鋼材の曲げ疲労検出法、非破壊検査 38-8 (1989) pp.671-676
- 4) 疲労損傷計測・評価に関する調査研究委員会編、疲労損傷計測・評価に関する調査研究報告書、日本プラントメンテナンス協会 (1996)



図(9-4) (N) 疲労損傷計測の差動電圧計測 (N/N) A=0. 図)

4-4 まとめ

焼文き巻

、e-eI 財会会学属金本日、用降の賃封の戻額をいほコ察願前連、吉出該親 (I
 集中誘導型交流電位差法による疲労損傷の評価法 450-240,qq (0891)て、単一
 -イEが輸X(EPI)のI財会会学属金本日、各地点の予算る1コ測時、並測、50、19、い

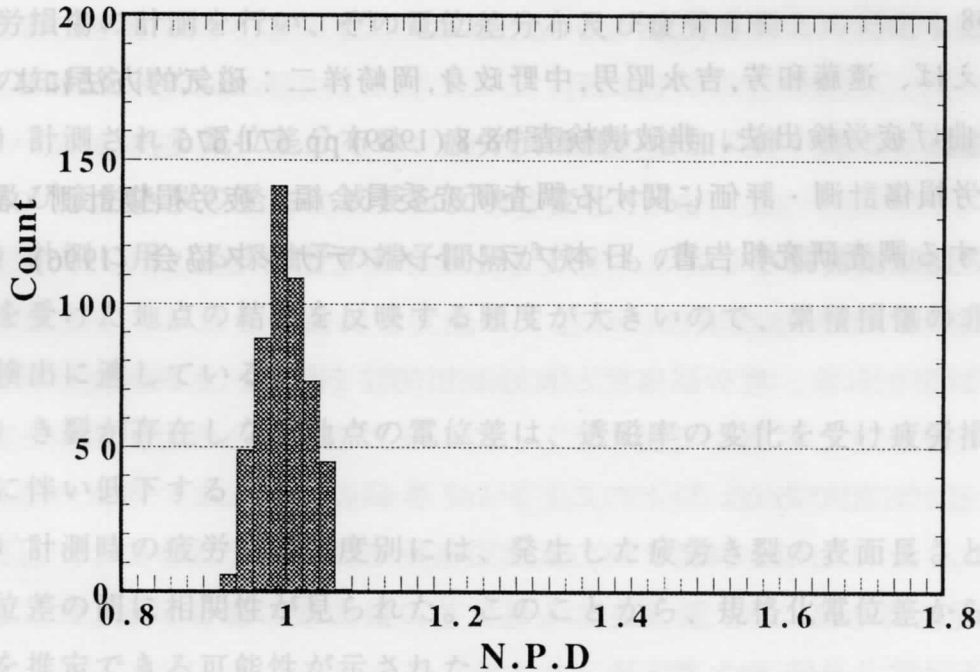


図 4-4(a)、規格化電位差のヒストグラム (N/N₂₅=0) 度の非破壊
 的な評価が可能である。

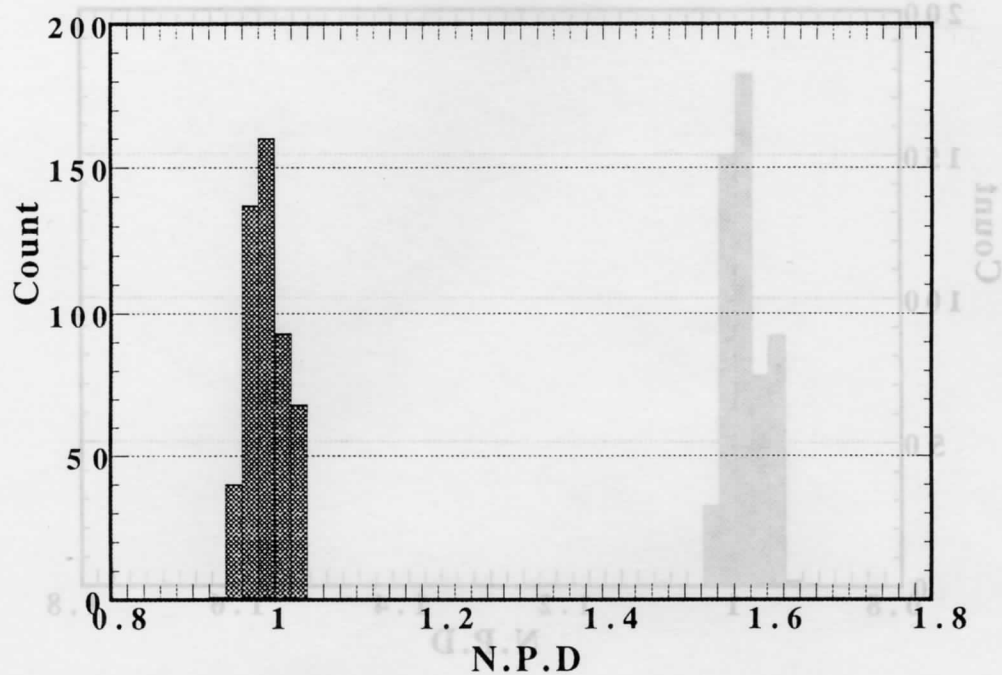


図 4-4(b) 規格化電位差のヒストグラム ($N/N_{25}=0.22$)

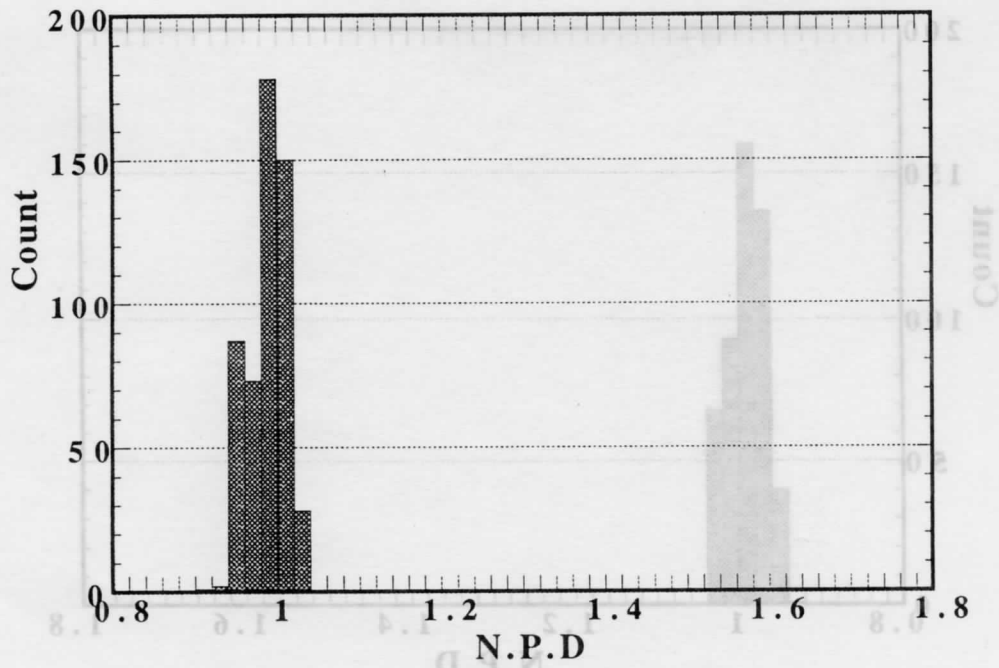
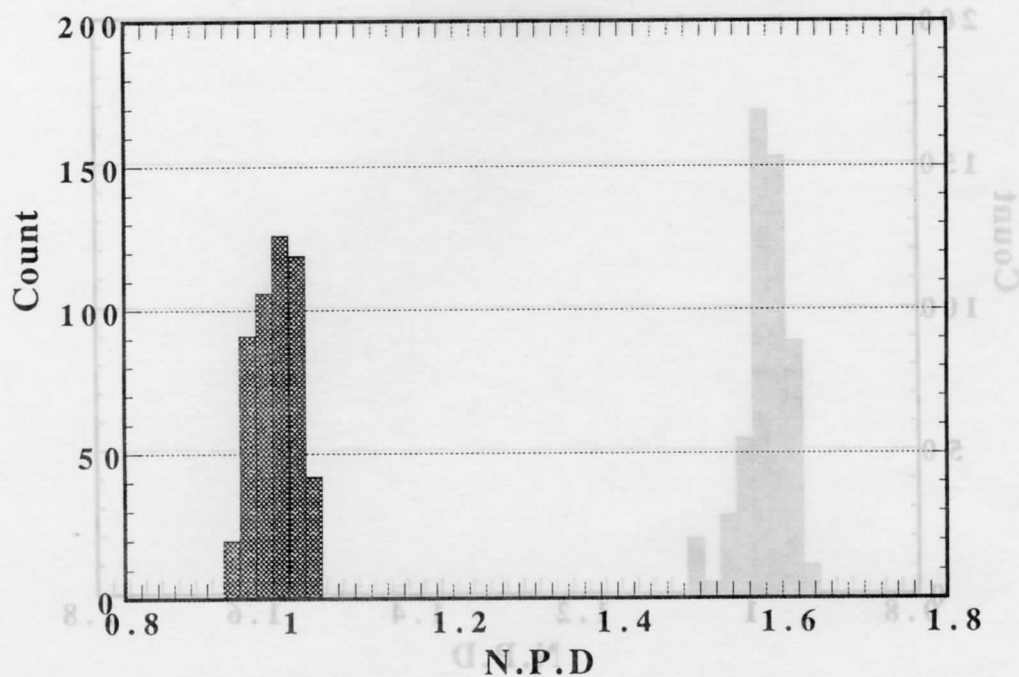


図 4-4(c) 規格化電位差のヒストグラム ($N/N_{25}=0.29$)



(図 4-4(d) 規格化電位差のヒストグラム ($N/N_{25}=0.41$))

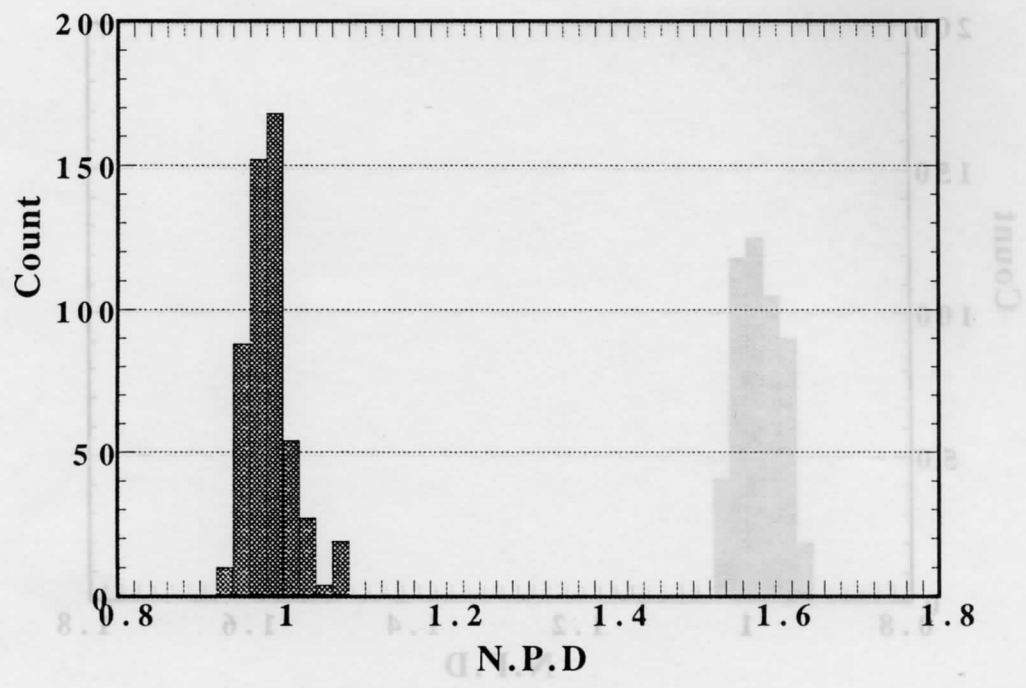
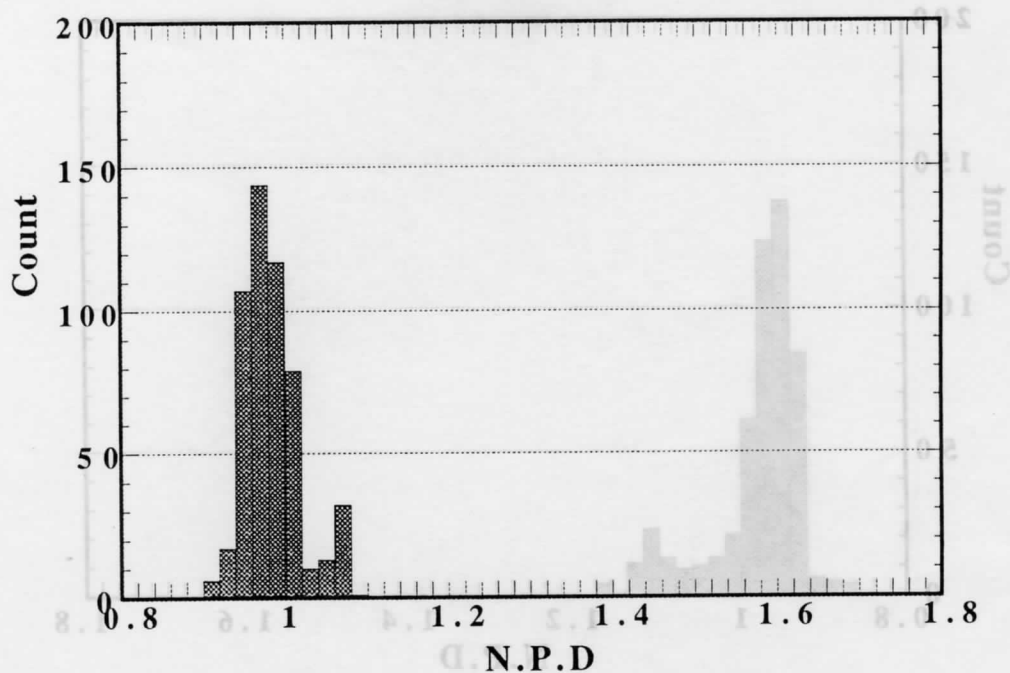


図 4-4(e) 規格化電位差のヒストグラム($N/N_{25}=0.47$)



(図 4-4(f) 規格化電位差のヒストグラム($N/N_{25}=0.54$))

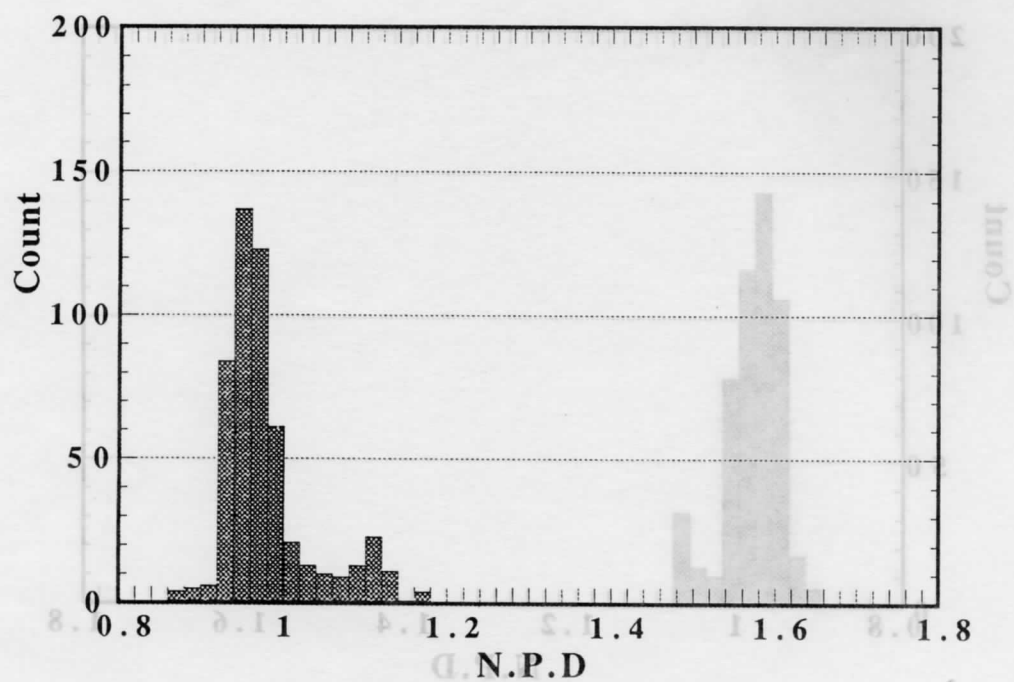


図 4-4 (g) 規格化電位差のヒストグラム ($N/N_{25}=0.62$)

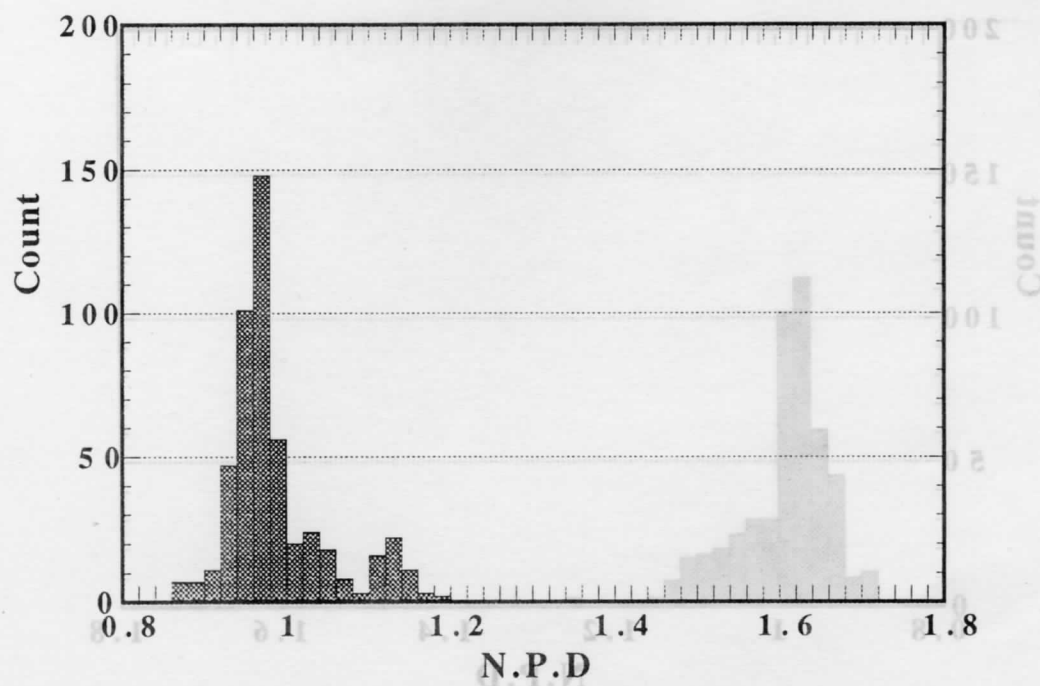


図 4-4(h) 規格化電位差のヒストグラム ($N/N_{25}=0.71$)

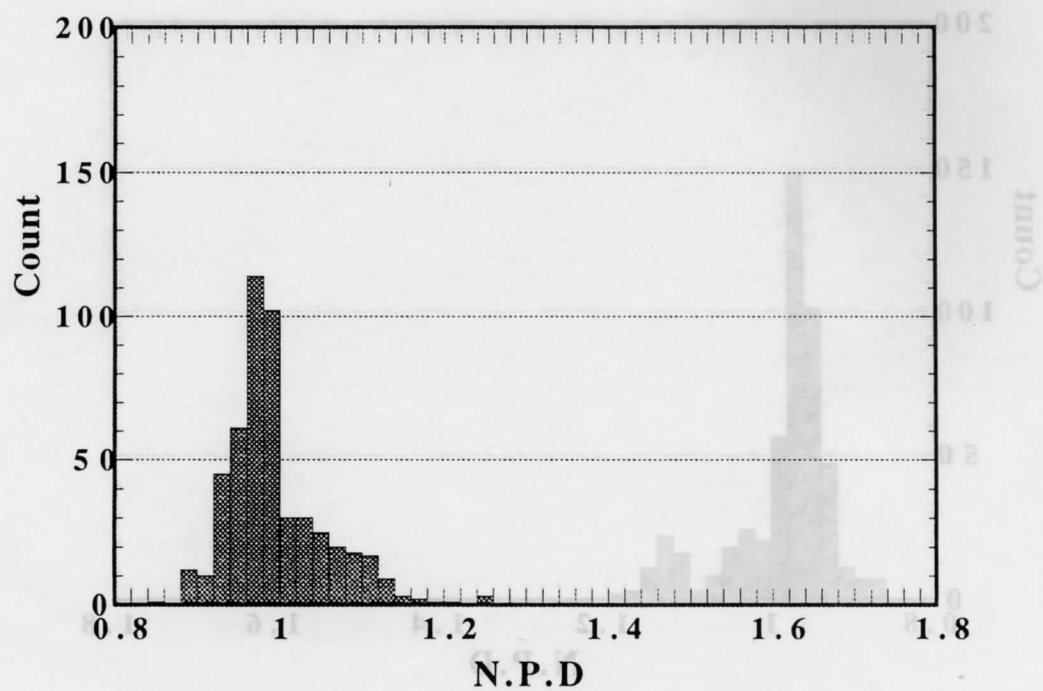


図 4-4 (i) 規格化電位差のヒストグラム ($N/N_{25}=0.82$)

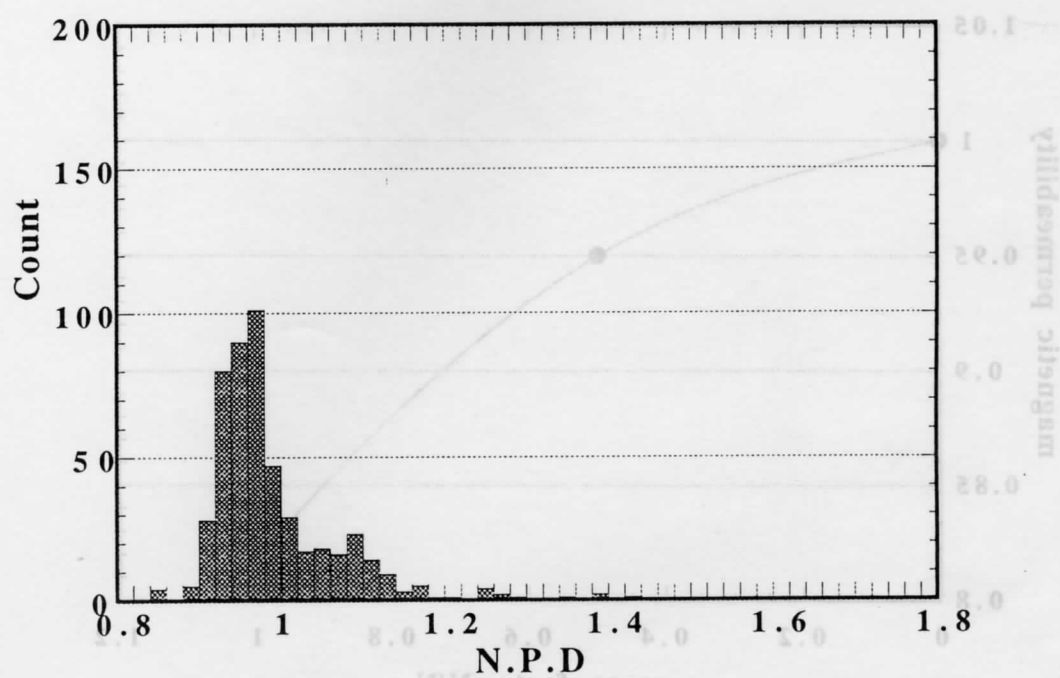
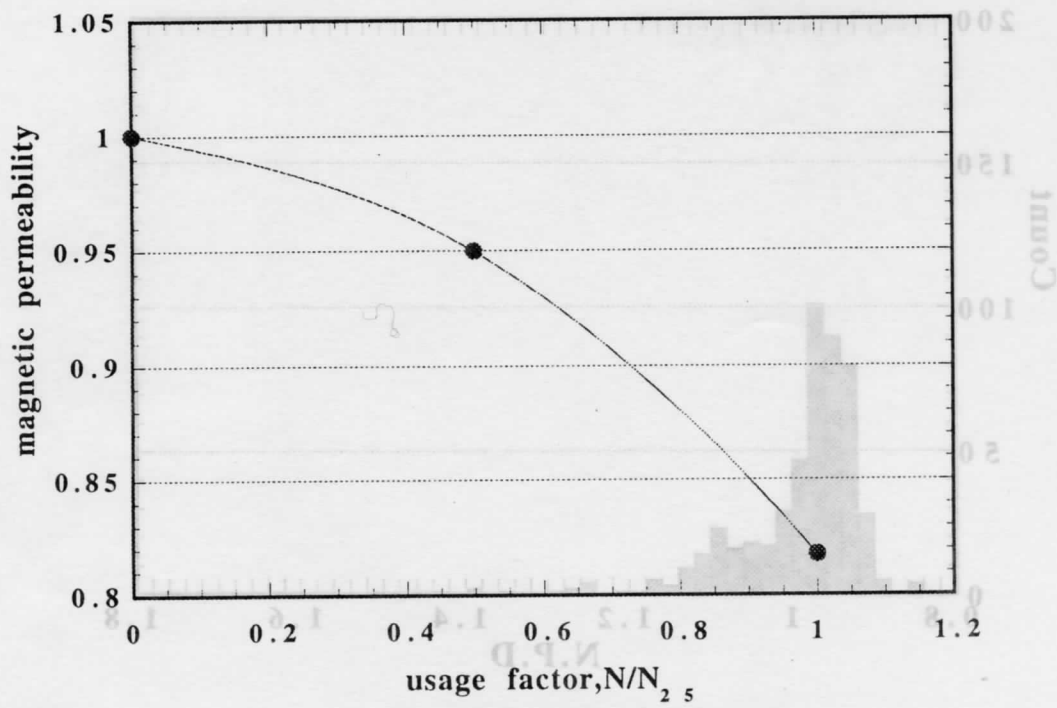


図 4-4(j) 規格化電位差のヒストグラム ($N/N_{25}=1.0$)



(0. 図 4-5 疲労損傷の進行に伴う透磁率の変化

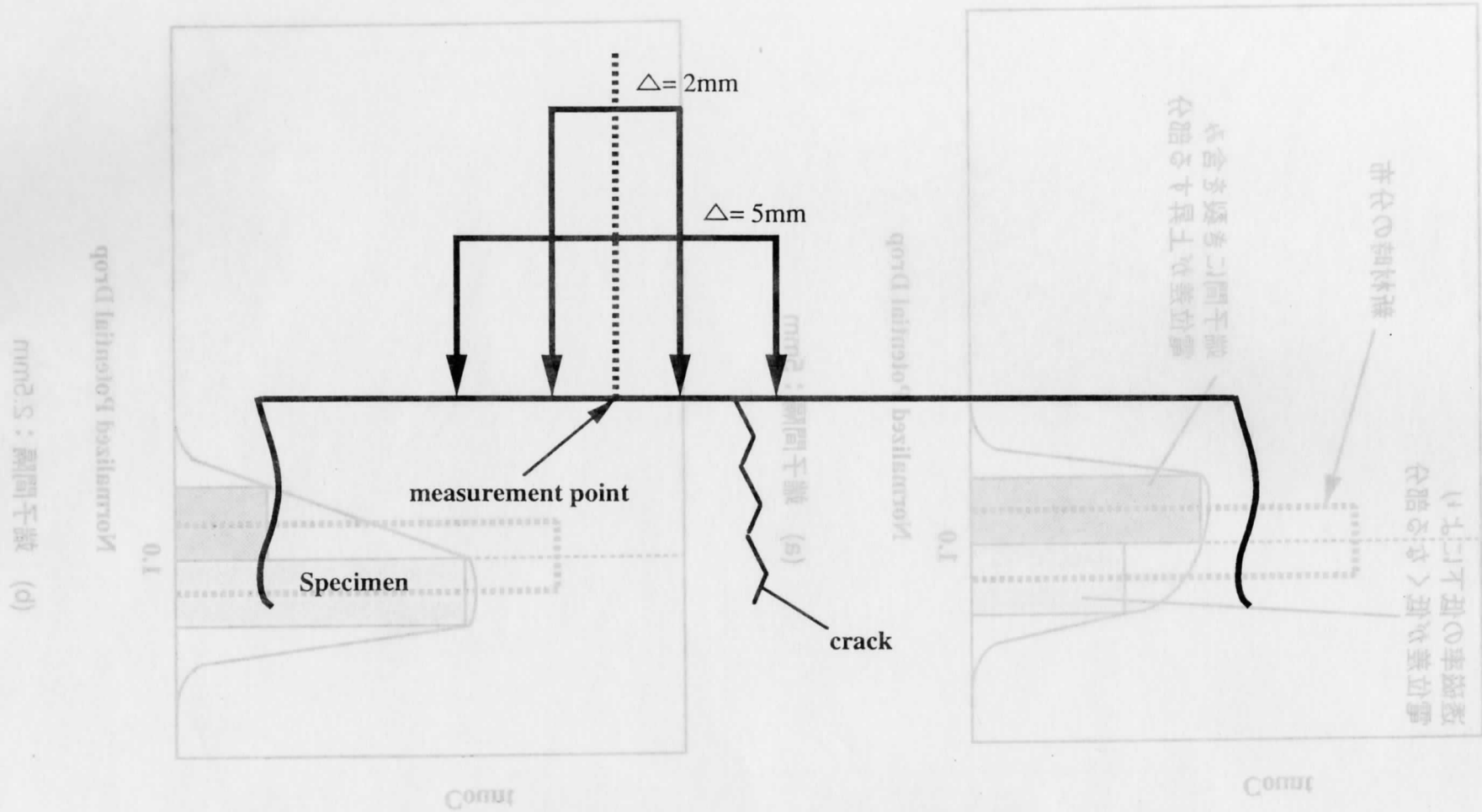
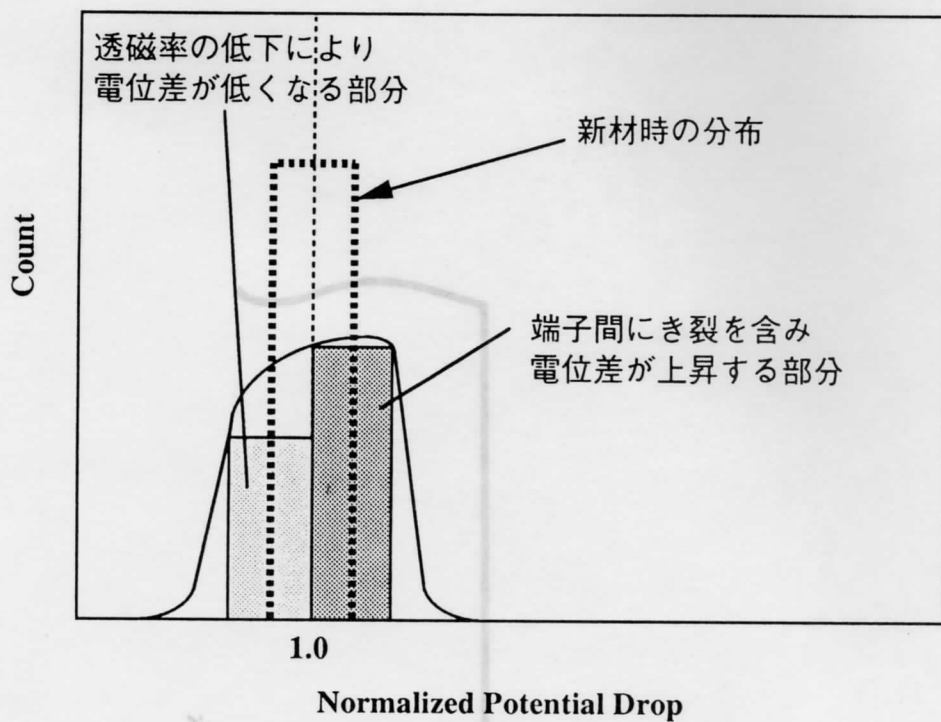
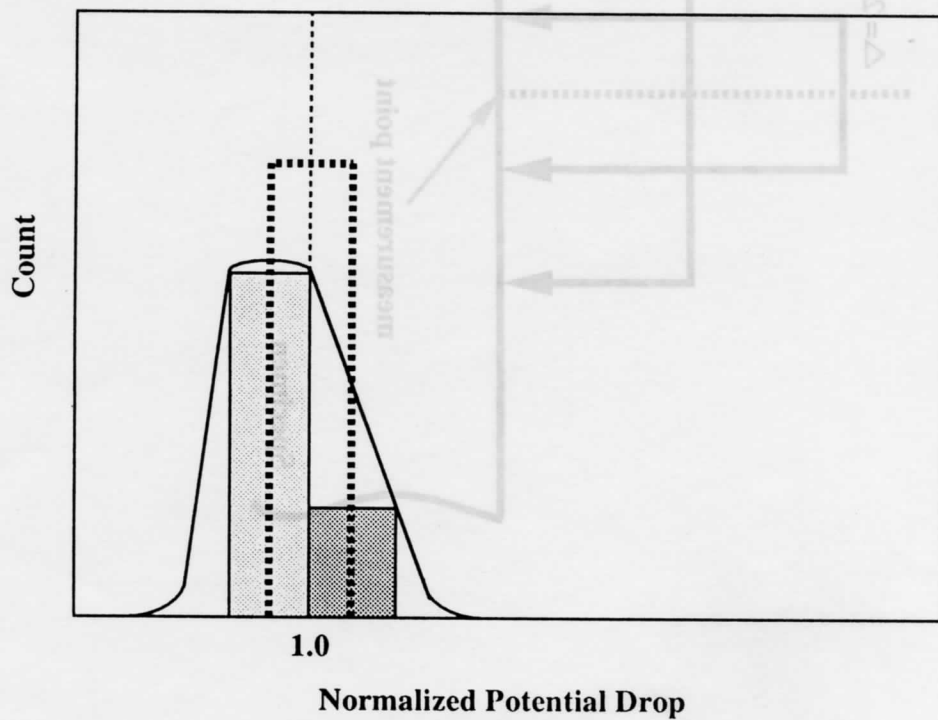


図4-6 端子間隔の違いによるき裂検出回数の相違

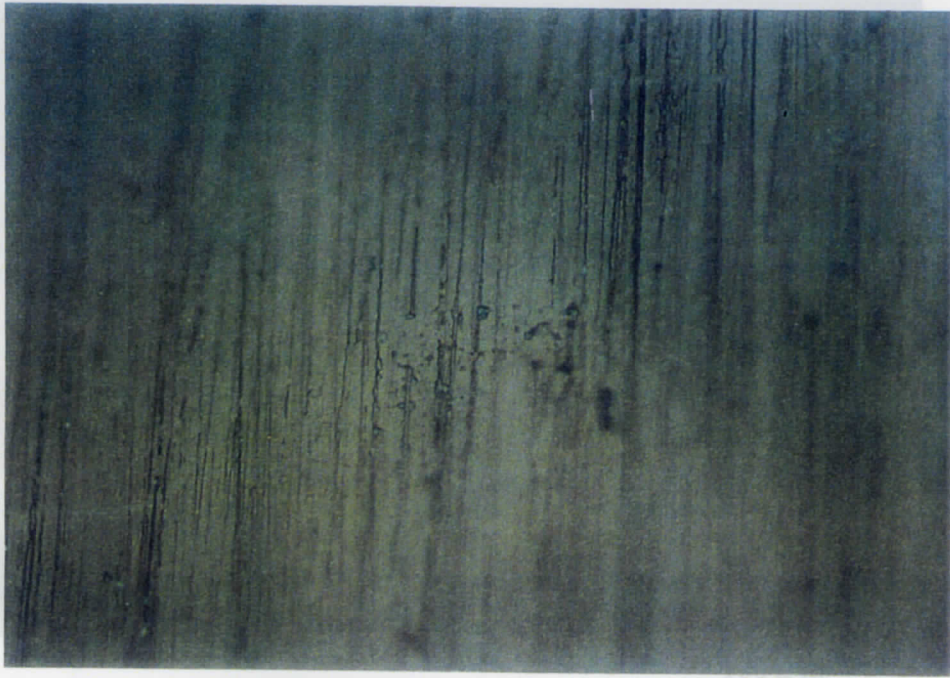


(a) 端子間隔：5mm



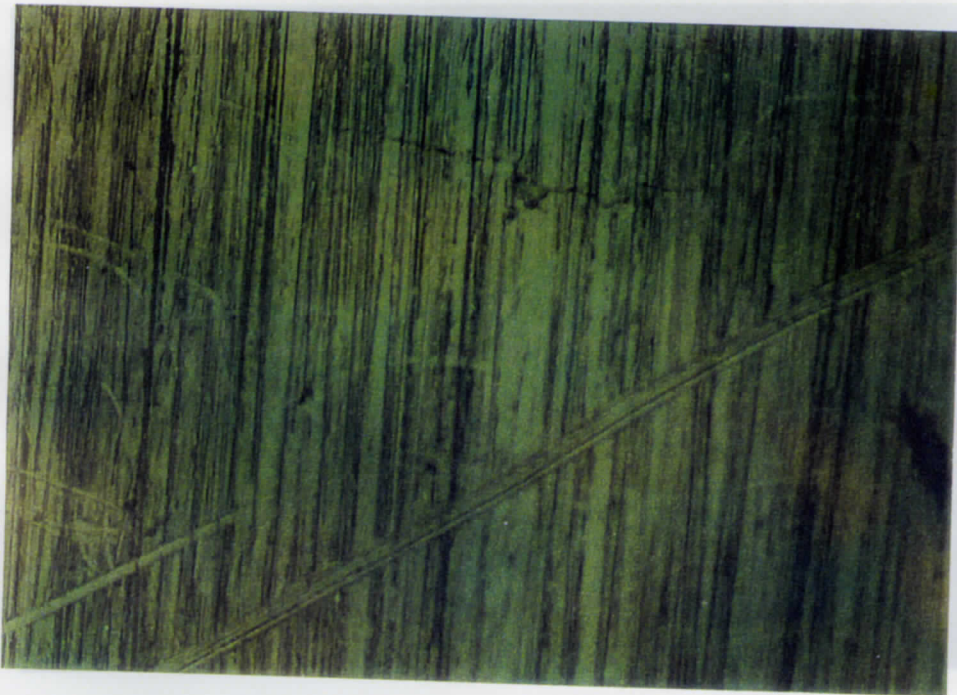
(b) 端子間隔：2.5mm

図4-7 き裂検出回数による電位差分布図の変化予測図



50 μm

(a) $N/N_{25} = 0.47$



100 μm

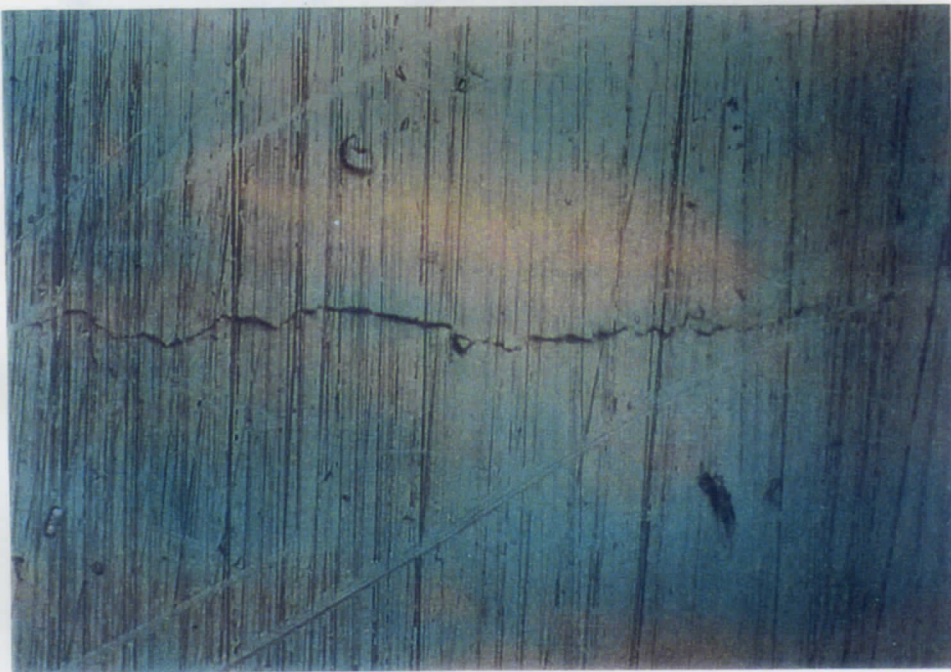
(b) $N/N_{25} = 0.54$

図4-8 レプリカ上で観察される疲労き裂



100 μm

(c) $N/N_{25}=0.62$



100 μm

(a) $N/N_{25}=0.71$

図4-8 レプリカ上で観察される疲労き裂

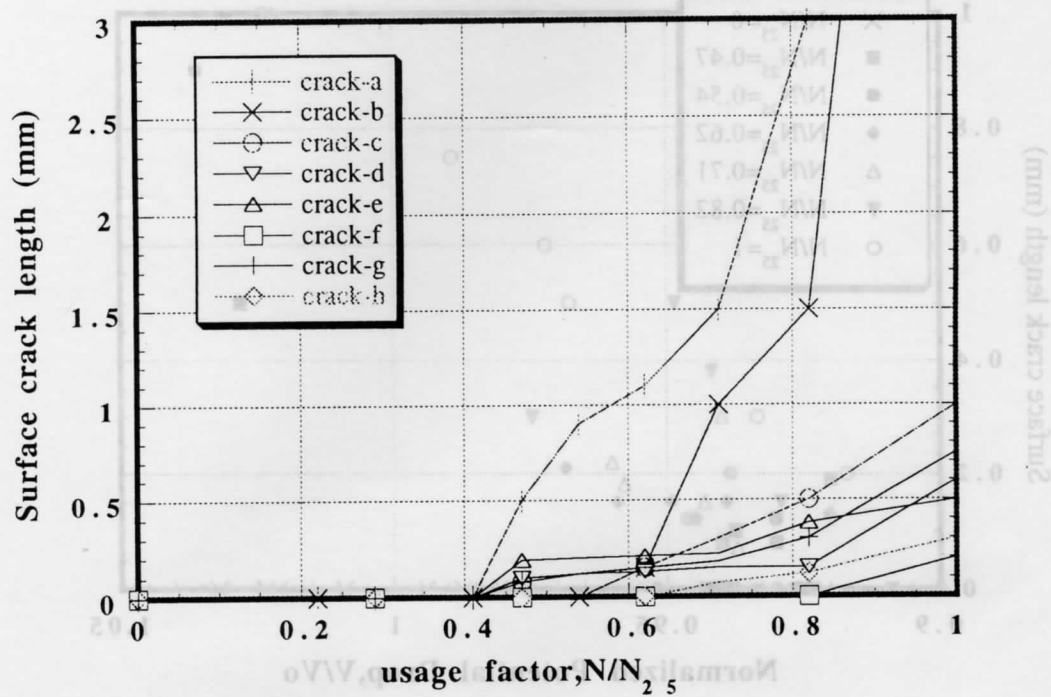


図 4-9 き裂長さと繰返し数比の関係

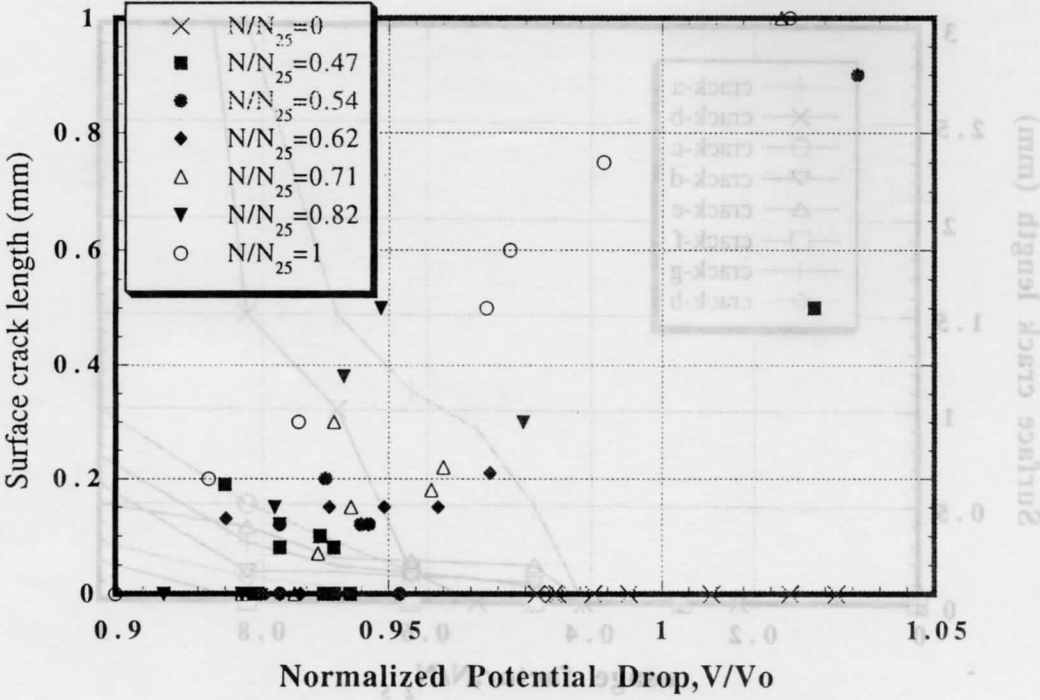


図 4-10 規格化電位差とき裂長さの関係

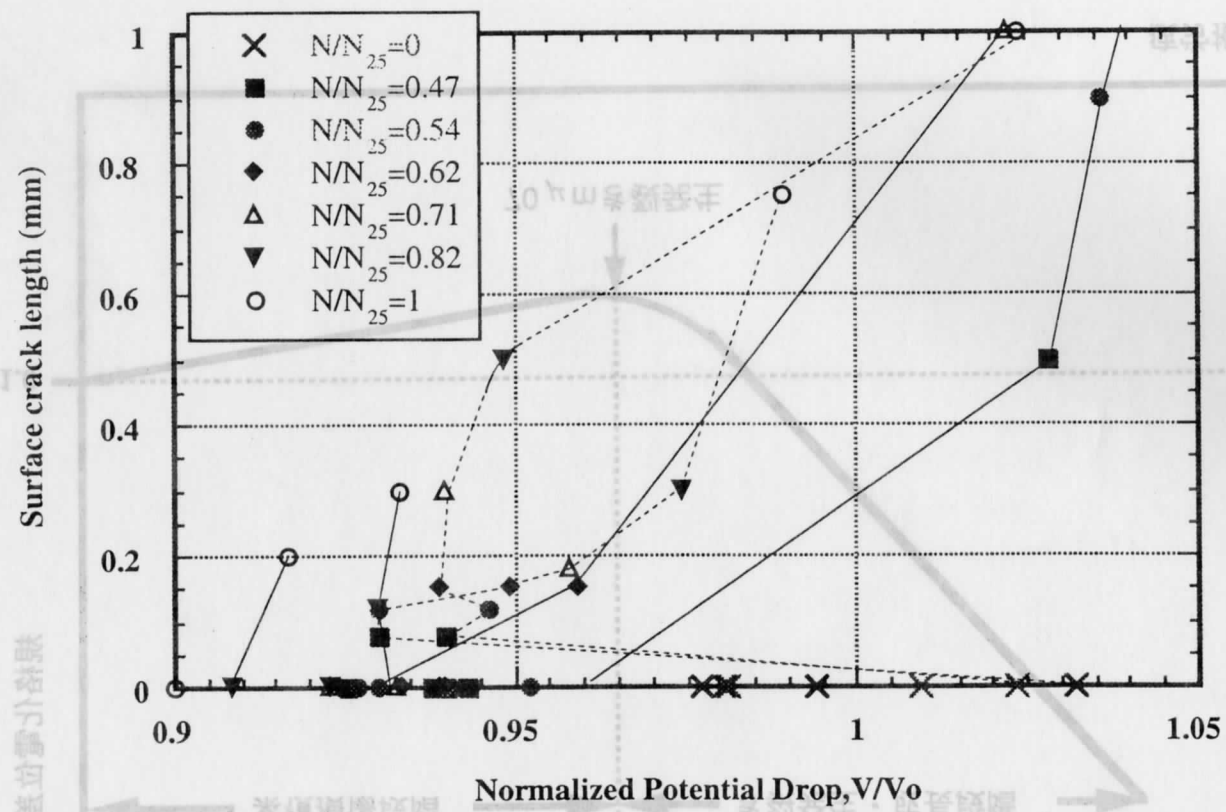


図4-11 各地点の規格化電位差とき裂長さの変化

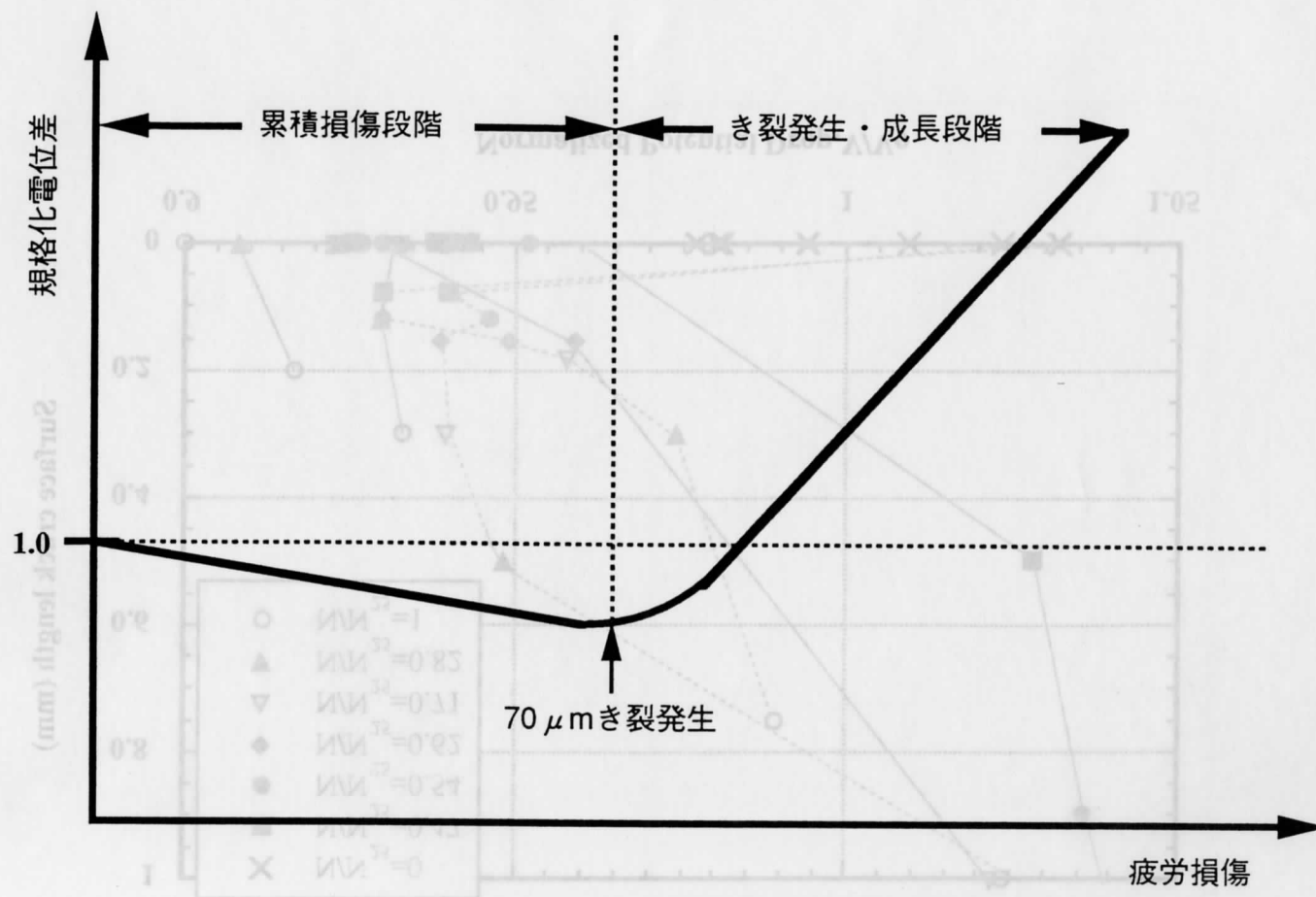


図4-12 疲労の進行に伴う電位差変化の模式図

(1) 計測される電位差分布は、疲労損傷度の増加に伴い生じる透過率の低下及び疲労き裂の発生・成長を反映し変化する。

(2) 計測に用いる探触子の端子間隔が狭いものは、き裂発生以前の累積損傷を受けた地点の結果を反映する頻度が高いので、累積損傷の非破壊的な

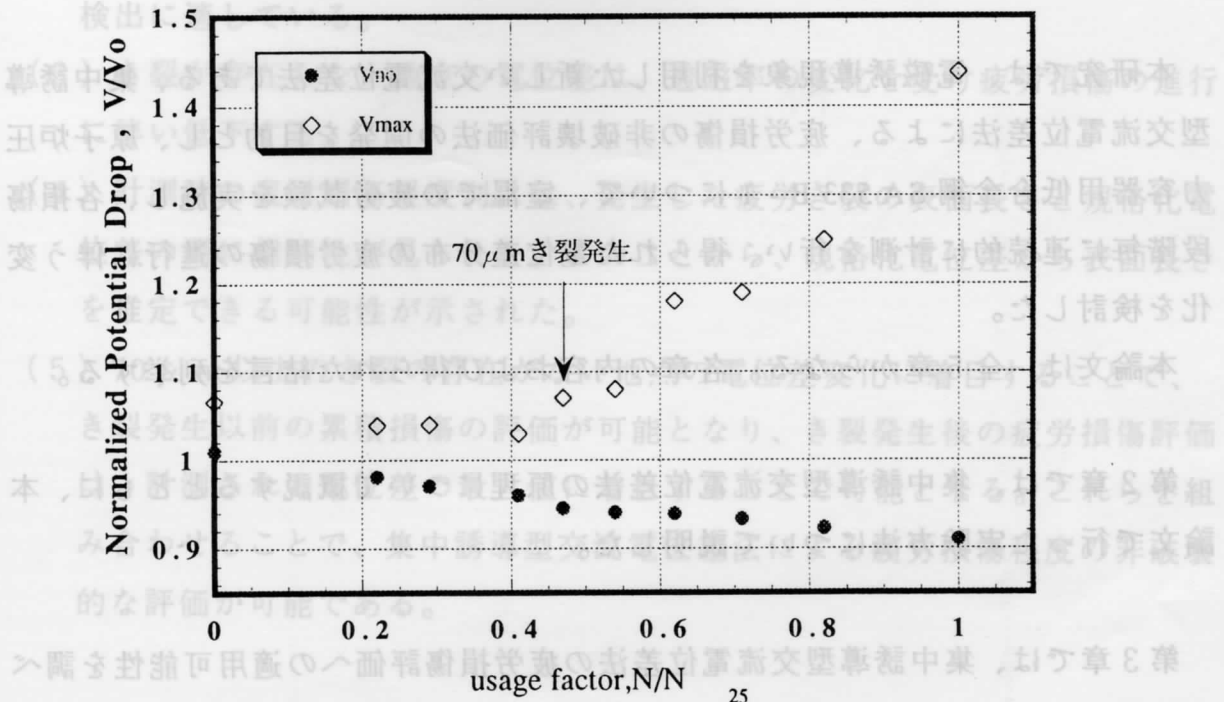


図 4-13 疲労損傷程度の評価線図

第5章 結 論

本研究では、電磁誘導現象を利用した新しい交流電位差法である、集中誘導型交流電位差法による、疲労損傷の非破壊評価法の開発を目的とし、原子炉圧力容器用低合金鋼 SA 533 B - 1 について、室温での疲労試験を実施し、各損傷段階毎に連続的に計測を行い、得られた電位差分布の疲労損傷の進行に伴う変化を検討した。

本論文は、全5章からなる。各章の内容および得られた結言を列挙する。

第2章では、集中誘導型交流電位差法の原理について概説するとともに、本論文で行った実験方法について説明した。

第3章では、集中誘導型交流電位差法の疲労損傷評価への適用可能性を調べるために、疲労試験中断材を作製し、損傷計測を行った。その結果以下の知見を得た。

- (1) 計測される電位差分布は、疲労損傷の進行に伴い変化する。このことから、疲労損傷程度を非破壊的に評価できる可能性が示された。
- (2) き裂発生以前の累積損傷段階においても、電位差に変化が見られたことから、累積損傷段階においても損傷の非破壊的な検出が可能であることが示された。

第4章では、集中誘導型交流電位差法による疲労損傷の評価法の開発を目的として、単一の試験片について疲労損傷を与え、各損傷段階を連続して非破壊的に疲労損傷の計測を行い、その電位差分布及び疲労き裂との対応などを検討した。また、疲労損傷の進行に伴う透磁率の変化を計測し、電位差に及ぼす影響を調べた。その結果以下の知見を得た。

- (1) 計測される電位差分布は、疲労損傷度の増加に伴い生じる透磁率の低下及び疲労き裂の発生・成長を反映し変化する。
- (2) 計測に用いる探触子の端子間隔が狭いものは、き裂発生以前の累積損傷を受けた地点の結果を反映する頻度が大きいので、累積損傷の非破壊的な検出に適している。
- (3) き裂が存在しない地点の電位差は、透磁率の変化を受け疲労損傷の進行に伴い低下する。
- (4) 計測時の疲労損傷程度別には、発生した疲労き裂の表面長さと規格化電位差の間に相関性が見られた。このことから、規格化電位差から表面長さを推定できる可能性が示された。
- (5) $70\ \mu\text{m}$ 以上のき裂の存在がない地点の電位差変化に着目することで、き裂発生以前の累積損傷の評価が可能となり、き裂発生後の疲労損傷評価は、計測される電位差の最大値に着目することで可能となる。これらを組み合わせることで、集中誘導型交流電位差法による疲労損傷程度の非破壊的な評価が可能である。

本報告書収録の学術雑誌等発表論文は本ファイルに登録しておりません。なお、このうち東北大学在籍の研究者の論文で、かつ、出版社等から著作権の許諾が得られた論文は、個別に **TOUR** に登録しております。